

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TEKNILLINEN TIEDEKUNTA
SÄHKÖTEKNIIKAN OSASTO

MIKROKONTROLLERIOHJAUS LED-RYHMÄLLE

Diplomityön aihe on hyväksytty Lappeenrannan teknillisen yliopiston sähkötekniikan osaston osastoneuvoston kokouksessa 18.8.2008.

Työn ohjaajina ja tarkastajina toimivat professori Pertti Silventoinen ja KTM Minna Karvinen.

Sulkavalla 4.9.2008.

Mikko Nykänen
Erkintie 1
58700 Sulkava

TIIVISTELMÄ

Tekijä: Nykänen, Mikko
Nimi: **Mikrokontrolleriohjaus led-ryhmälle**
Osasto: Sähkötekniikka, Teknillinen tiedekunta
Vuosi: 2008
Paikka: Sulkava/Savonlinna

Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 55 sivua, 29 kuvaa ja 1 taulukko.

Tarkastajat: Professori Pertti Silventoinen ja KTM Minna Karvinen
Hakusanat: mikrokontrolleriohjaus, LED, valkoinen valo

Luonnonvarojen ehtyminen ja ympäristön saastuminen on luonut kysyntää uusille, energiaa säästäville ja ympäristöystävällisille teknologioille. Valaistuksessa tällainen teknologia on led-tekniikka. Led-tekniikalla on useita etuja verrattuna kilpaileviin tekniikoihin kuten pitkä elinikä, ympäristöystävällisyys ja mekaaninen kestävyys. Ledejä käytetään nykyään laajalti erilaisissa erikoissovelluksissa, erityisesti jos vaatimuksena on valon värillisuus. Näihin päiviin asti ledien hinta ja heikko valontuotto ovat rajoittaneet led-valaisimien yleistymistä hehkulamppujen ja muiden valaisintyyppien korvaajina. Tekniikan nopea kehittyminen on tehnyt led-tekniikasta varteenotettavan vaihtoehdon myös yleisvalaistukseen. Uusimpien valkoisten ledien valotehokkuus on 2 - 5 -kertainen hehkulamppuun verrattuna. Led-tekniikassa on vielä paljon käyttämätöntä potentiaalia, tulevaisuudessa päästäneen 10 - 15 -kertaiseen valotehokkuuteen hehkulamppuun verrattuna.

Työssä suunnitellaan mikrokontrolleripohjainen ohjausjärjestelmä valkoista valoa tuottavalle led-valaisimelle, jonka värisävyä ja kirkkautta käyttäjä voi säätää. Valkoinen valo synnytetään sekoittamalla neljän erivärisen led-rivin valoa. Mikrokontrolleri ohjaa kutakin led-riviä väriensekoitusteoriaan perustuen. Mikrokontrolleriohjaus huomioi myös ledien optisten ominaisuuksien muutokset lämpötilan suhteen. Mikrokontrolleriohjauksen suorituskyky todetaan käytännön mittauksilla.

ABSTRACT

Author: Nykänen, Mikko
Subject: **Microcontroller control for a LED group**
Department: Electrical Engineering, Faculty of Technology
Year: 2008
Place: Sulkava/Savonlinna

Master's Thesis. Lappeenranta University of Technology. 55 pages, 29 figures and 1 table.

Supervisors: Professor Pertti Silventoinen and M.Sc.E Minna Karvinen

Keywords: microcontroller control, LED, white light

The depletion of natural resources and the pollution of the environment have created demand for new energy-saving and environmentally friendly technologies. In lighting such technology is LED technique. LED technique offers several advantages over the competing techniques, such as long life span, eco-friendliness and mechanical robustness. At present LED technique is widely used in special applications, especially when coloured light is required. Until now the price and poor illuminance of the LED technique have limited the emergence of LED light as replacements of incandescent light bulbs and other light sources. During the last few years the rapid development of the technique has made LED technique a viable alternative in general lighting, too. The luminous efficiency of state-of-the-art white LED is two to five times better compared to an incandescent light bulb. There is still a lot of unused potential. In the future it is possible to reach a luminous efficiency 10 - 15 times higher compared to an incandescent light bulb.

In this thesis a microcontroller based control system will be designed for a white light source whose shade and brightness can be adjusted by the user. White light is produced by a mixture of four LED rows of different colour. The microcontroller controls each LED row based on colour mixing theory. In addition, the control system compensates for changes in the optical properties of the LEDs caused by temperature. The performance of the control system will be proven with measurements.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Savonlinnassa toimivalle Savled/Diranet Oy:lle.

Työn tarkastajina toimivat professori Pertti Silventoinen ja KTM Minna Karvinen, joita haluan kiittää opastuksesta ja hyvistä neuvoista. Seija Kemppistä kiitän avusta tiivistelmän kääntämisessä. Savled:lle kuuluu kiitos mielenkiintoisen haasteen tarjoamisesta. Haluan kiittää opiskelutovereitani menneistä vuosista. Asioiden pohdiskelu teidän kanssanne helpotti oleellisesti uusien asioiden omaksumista.

Lisäksi haluan kiittää lähiomaisiani saamastani tuesta koko opiskeluajalta. Kiitollinen täytyy olla myös terveydestä, joka on mahdollistanut fyysiset harrasteet ja siten jaksamisen opiskeluissa.

SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET	2
1 JOHDANTO	5
2 NÄKÖAISTIMUKSEN SYNTY	9
2.1 Valonlähde	9
2.2 Valaistava kohde	11
2.3 Vastaanottaja	12
3 VALON MATEMAATTINEN MALLINTAMINEN	14
3.1 Värikoordinaatistot	14
3.1.1 CIE 1931 xyY	14
3.1.2 CIE 1976 $L'u'v'$	17
3.2 Väriämpötila	18
3.3 Värintoistoindeksi	20
3.4 Valotehokkuus	22
4 LED-TEKNIikka VALAISTUKSESSA	24
4.1 Lämpötila- ja aikariippuvat ominaisuudet	28
4.2 Takaisinkytkentämenetelmät	31
4.2.1 Liitoslämpötilakompensointi	32
4.2.2 Optinen takaisinkytkentä	32
5 MIKROKONTROLLERIOHJAUS	34
5.1 Ledien PWM-ohjaus	35
5.2 Lämpötilakompensointi	36
5.2.1 Kalibrointimittaukset	36
5.3 Mikrokontrollerin pääohjelma	38
6 MITTAUSTULOKSET	40
6.1 Valon stabiilisuus lämpötilan suhteen	40
6.2 Valon stabiilisuus ajan suhteen	43
6.3 Värintoistoindeksi	45
7 MITTAUSTULOSTEN ARVIOINTI	46
7.1 Tuotteen jatkokehitys	48
8 YHTEENVETO	50
LÄHDELUETTELO	52

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

A	pinta-ala
c	vakio
D	kytkentäkerroin
ΔE	euklidinen etäisyys, värikoordinaattiero
I	virta
K	säteilyn valotehokkuus
K_m	valotehokkuusvakio
L	vaaleus
M	säteilyeksitaanssi
P	teho
R	heijastuskerroin
R_a	yleinen värintoistoindeksi
R_i	erikoisvärintoistoindeksi
$\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$	värinsovitusfunktio
S	säteilysuure
T	lämpötila, läpäisykerroin
U	jännite
u', v'	CIE 1976 värikoordinaatti
V	silmän spektriherkkyys
V'	silmän spektriherkkyys pimeässä
X, Y, Z	kolmivärikomponentti
x, y, z	CIE 1931 värikoordinaatti
$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$	CIE 1931 värinsovitusfunktio

kreikkalaiset

γ	skaalauskerroin
$\Delta u'v'$	CIE 1976 värikoordinaattiero
$\Delta\lambda_{1/2}$	spektrin puolileveys
η_e	säteilyhyötysuhde
η_v	valotehokkuus

θ	lämpöresistanssi
λ	aallonpituus
Φ	valovirta
Φ_e	säteilyteho

alaindeksit

a	amber, meripihka
b	piirilevy, sininen
D	hallitseva
F	myötäsuuntainen
g	vihreä
i	ledin indeksi
j	liitos
jb	liitos-piirilevy
max	maksimi
mix	sekoitus
p	huippu
r	punainen

lyhenteet

A	amber, meripihka
AD	analogi/digitaali
AllnGaP	alumiini-gallium-indium-fosfidi
B	blue, sininen
CCT	Correlated Color Temperature, ekvivalentti värilämpötila
CIE	International Commission On Illumination, kansainvälinen valaistuskomissio
CQS	Color Quality Scale
CRI	Color Rendering Index, värintoistoindeksi
G	green, vihreä
InGaN	indium-gallium-nitridi
LCD	Liquid Crystal Display, nestekidenäyttö
LED	Light Emitting Diode, valodiodi

NIST	National Institute of Standards and Technology
NTIS	National Technical Information Service
PWM	Pulse Width Modulation, pulssinleveysmodulaatio
R	Red, punainen
ROM	Read Only Memory, lukumuisti
UCS	Uniform Color Space, tasajakoinen väriavaruus
VIS	Visible Spectrum, näkyvän valon alue

1 JOHDANTO

Luonnonvarojen ehtyminen ja ympäristön saastuminen on luonut kysyntää uusille, energiaa säästäville ja ympäristöystävällisille teknologioille. Valaistuksessa tällainen teknologia on led-tekniikka. Valaistuksen osuus koko maailman sähkönkulutuksesta on merkittävä, n. 20 %. On laskettu, että led-tekniikalla pystytään säästämään EU:n alueella nykyisestä valaistuksen käyttämästä sähköstä 30 % vuoteen 2015 ja jopa 50 % vuoteen 2025 mennessä. Nykyisin kotitalouksissa yleisimmin käytettävät valonlähteet ovat hehkulamppu ja loisteputki. Led-valaisimien yleistymistä on rajoittanut hinnan lisäksi heikko valontuotto suhteessa käytettyyn sähkötehoon. Nykyisten kaupallisten valkoisten ledien valotehokkuus on n. 2 - 5 -kertainen hehkulamppuun verrattuna, kun loisteputkien valotehokkuus on puolestaan noin viisinkertainen hehkulamppuun verrattuna. Led-tekniikassa on vielä paljon käyttämätöntä potentiaalia. Tulevaisuudessa uskotaan päästävän 10 - 15 -kertaiseen valotehokkuuteen hehkulamppuun nähden (EU, 2008), (Ohno, 2006).

Led-tekniikalla on useita kiistattomia etuja muihin valaistustekniikoihin nähden. Ledit ovat ympäristöystävällisiä, koska ne eivät sisällä myrkyllisiä aineita kuten elohopeaa. Ledien käyttöikä voi olla jopa 100000 tuntia, kun hehkulamppujen käyttöikä on n. 1000 tuntia ja loistevalaisimilla n. 10000 tuntia. Pitkä käyttöikä puoltaa ledien käyttöä erityisesti vaikeapääsyisissä kohteissa. Ledit ovat mekaanisesti kestäviä, koska ne eivät sisällä helposti särkyviä osia. Tämä on eduksi mekaanisen rasituksen alaisissa kohteissa kuten työkoneissa. Ledit ovat pienikokoisia, jonka vuoksi niitä voidaan käyttää myös aivan uudenlaisissa sovelluskohteissa. Lisäksi ledit toimivat matalilla jännitetasoilla, mikä helpottaa sähköturvallisuuden suunnittelua. Suurin osa perinteisistä valaisinratkaisuista säteilee osittain ultraviolett- tai infrapuna-alueella. Ledien säteily keskittyy kokonaan näkyvän valon alueelle. Tämän ansiosta ledejä voidaan käyttää mm. museoissa, missä ultraviolettisäteilyn hajottava vaikutus on erityisen haitallista. Yleisesti led-valaisimien värintoisto-ominaisuudet eivät yllä hehkulamppun tasolle, mutta niillä voidaan päästä samaan luokkaan loistevalaisimien kanssa (Nathan, 2006), (Philips, 2006).

Nykyään led-tekniikka hallitsee sovelluksia, joissa käytetään värillisiä valoja. Koska ledejä on valmiiksi saatavilla usean erivärisenä, ei tarvita erillisistä värisuodatinta tuottamaan haluttua väriä. Tällaisissa sovelluskohteissa led-tekniikan puolesta puhuu myös pitkä

käyttöikä, kestävyys ja energian säästö. Värillisiä ledejä käytetään paljon erilaisissa valotauluissa sekä merkinanto- ja varoitusvaloissa. Tuttuja sovelluskohteita ovat esimerkiksi television valmiustilaa ilmaiseva merkkivalo ja vaikkapa huoltoaseman mainostaulu. Ledejä käytetään paljon myös liikenteessä, josta esimerkkinä liikennevalot ja auton takavalot. Valkoisia ledejä käytetään lähinnä erikoissovelluksissa kuten lentokoneissa lukuvaloina, tunnelmavalaisuudessa sekä matkapuhelimien ja tietokonenäyttöjen taustavaloina. Yleisvalaistuksessa ledejä ei nykyään vielä käytetä laajemmassa mittakaavassa. Sovelluskohteet rajoittuvat lähinnä arkkitehtonisiin kohteisiin ja erilaisiin kokeiluihin. Tulevaisuudessa suurin haaste on kehittää led-tekniikasta riittävän houkutteleva myös yleiseen valaistukseen (Nathan, 2006), (NTIS, 2003).

Ledien sähköiset ja optiset ominaisuudet muuttuvat virran, ajan ja lämpötilan funktiona. Valmistusteknisistä syistä vaihtelua esiintyy runsaasti myös eri yksilöiden välillä. Ledien ikääntyessä niiden valotehokkuus pienenee, mutta ne eivät sammu kokonaan kuten esimerkiksi hehkulamppu. Ledin liitoslämpötilan muuttuessa sekä ledin kirkkaus että väri muuttuvat. Jos valon stabiilisuus on tärkeää, pitää kirkkaus- ja värimuutokset kompensoida erillisellä säätöjärjestelmällä. (Nathan, 2006), (Schubert, 2006).

Ledeillä pystytään tuottamaan valkoista valoa kahdella eri menetelmällä. Yksinkertaisempi menetelmä on käyttää valkoista lediä. Valkoisen ledin valo synnytetään joko ultraviolettisäteilystä tai sinisestä valosta loisteaineiden avulla. Loisteaine muuttaa ultraviolettisäteilyn näkyvän valon alueelle tai sinisen valon tapauksessa osan säteilystä vihreän ja punaisen värin alueelle. Toinen menetelmä, joka on järjestelmän suunnittelun kannalta haasteellisempää, on sekoittaa useamman erivärisen ledin valoa. Menetelmän etuna on teoreettisesti suurempi valotehokkuus, koska loisteaineessa tapahtuvaa tehohäviötä ei ole. Lisäksi lämpötilan muutoksesta aiheutuva värimuutos pystytään kompensoimaan säätöjärjestelmällä. Valkoisen ledin tapauksessa värimuutosta ei voida kompensoida. Sekoitusperiaate sopii siten paremmin sovelluksiin, joissa värin pysyvyys on tärkeää. Sekoitusperiaate mahdollistaa reaaliaikaisen himmennuksen ja sävynsäädön. Valkoisilla ledeillä voidaan toteuttaa vain himmennys (Steigerwald, 2002).

Työssä suunnitellaan mikrokontrolleriohjaus valkoista valoa tuottavalle led-valaisimelle, jonka sävyä ja kirkkautta käyttäjä voi säätää reaaliaikaisesti. Reaaliaikaisen sävyn- ja kirkkaussäädön ansiosta käyttäjä voi säätää valaistuksen tarkalleen kyseiseen sovelluskohteeseen sopivaksi. Valkoinen valo tuotetaan sekoittamalla punaisen, vihreän, sinisen ja meripihkan väristen led-rivien valoa. Näiden suhteellisia intensiteettejä säädetään pulssinleveysmodulaatiolla (PWM). Pulssinleveyksien laskenta toteutetaan mikrokontrollerilla. Mikrokontrolleriohjaus sisältää myös säätöalgoritmin, joka kompensoi ledien optisten ominaisuuksien muutokset lämpötilan suhteen. Takaisinkytkentäsignaaleina käytetään ledien kynnyksjännitteitä, joiden yhteys ledien liitoslämpötilaan ja optisiin ominaisuuksiin selvitetään kalibrointimittauksien avulla. Vastaavalla periaatteella ja ominaisuuksilla toteutettuja kaupallisia tuotteita ei ole saatavilla.

Työn tavoitteena on suunnitella valaisin, joka on värintoisto-ominaisuuksiltaan mahdollisimman hyvä kaikilla valkoisen värisävyillä. Vaatimuksena on myös valon värin ja kirkkauden riittävä stabiilisuus lämpötilan ja ajan funktiona. Valaisinta tullaan käyttämään kohteissa, joissa luonnollinen värintoisto on ensisijaisen tärkeää. Eräs tällainen sovelluskohde voisi olla vaikkapa taidegalleria. Suunniteltavan valaisimen on tarkoitus toimia prototyyppinä, jonka pohjalta voidaan tehdä jatkokehitystä kohti tuotantoon soveltuvaa mallia.

Työn sisältö luvuittain:

Kappaleessa 2 tarkastellaan yleisesti valon ominaisuuksia sekä näköaistimuksen syntyä. Kappaleessa esitellään työn kannalta tarpeelliset radiometriset ja fotometriset suureet.

Kappaleessa 3 käsitellään teorioita, joiden avulla ihmisen näkökykyä käsitellään matemaattisesti. Lisäksi esitellään suureet ja mittausmenetelmät, joilla vertaillaan eri valonlähteitä.

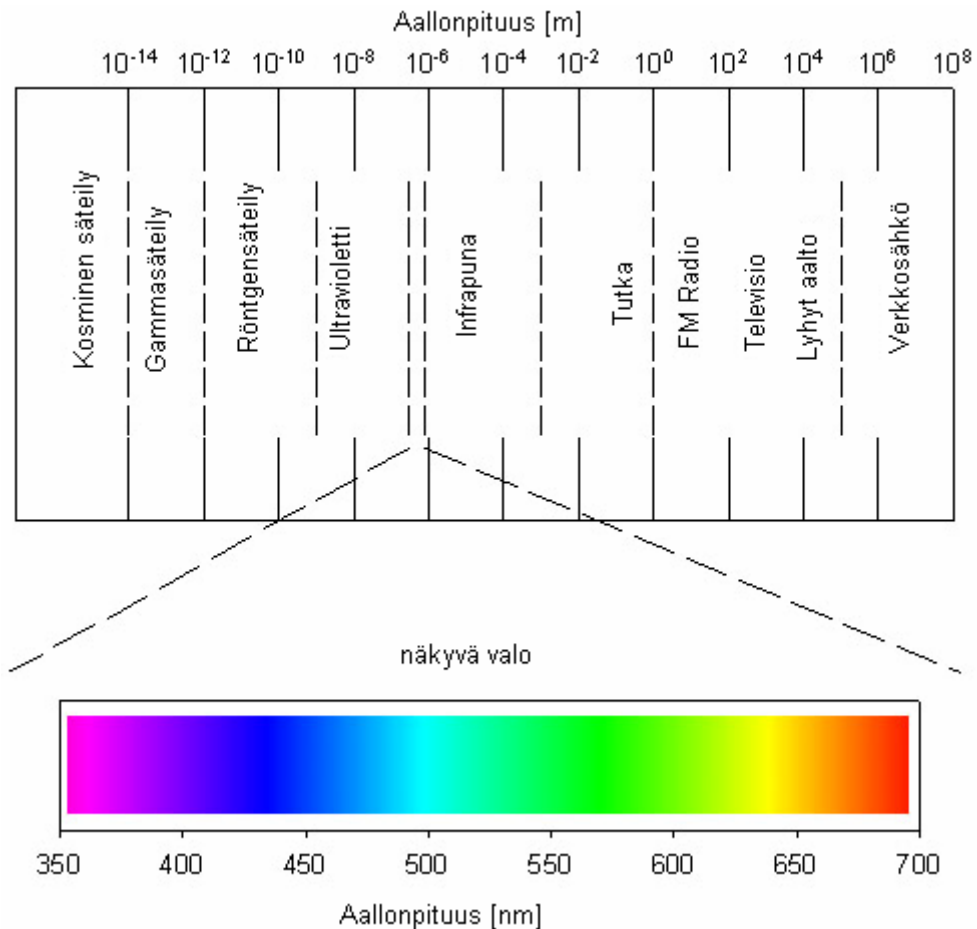
Kappaleessa 4 kerrotaan ledien optisista ja sähköisistä ominaisuuksista sekä näiden virta-, aika- ja lämpötilariippuvuudesta. Esitetään menetelmät valkoisen valon tuottoon ledeillä. Luodaan katsaus erilaisiin säätömenetelmiin, joilla voidaan kompensoida ledien optisten ominaisuuksien muutokset ajan ja lämpötilan suhteen.

Kappaleessa 5 esitellään suunnitellun valaisimen mikrokontrolleriohjaus. Selvitetään valittuun säätömenetelmään liittyvä teoreettinen pohja ja kalibrointimittaukset.

Kappaleissa 6 ja 7 esitetään mittaustulokset, tarkastellaan säädön toimivuutta sekä pohditaan tuotteen jatkokehitysmahdollisuuksia.

2 NÄKÖAISTIMUKSEN SYNTY

Kuvassa 1 on esitetty sähkömagneettisen säteilyn spektri. Ihmissilmän havaitsema valo on sähkömagneettista säteilyä, jonka aallonpituus on välillä 400 - 780 nm. Valaistustekniikan kannalta kiinnostava alue sisältää näkyvän valon lisäksi ultraviolett- ja infrapuna-alueet, koska lähes kaikki valonlähteet säteilevät myös näillä alueilla (Halonen, 1992).

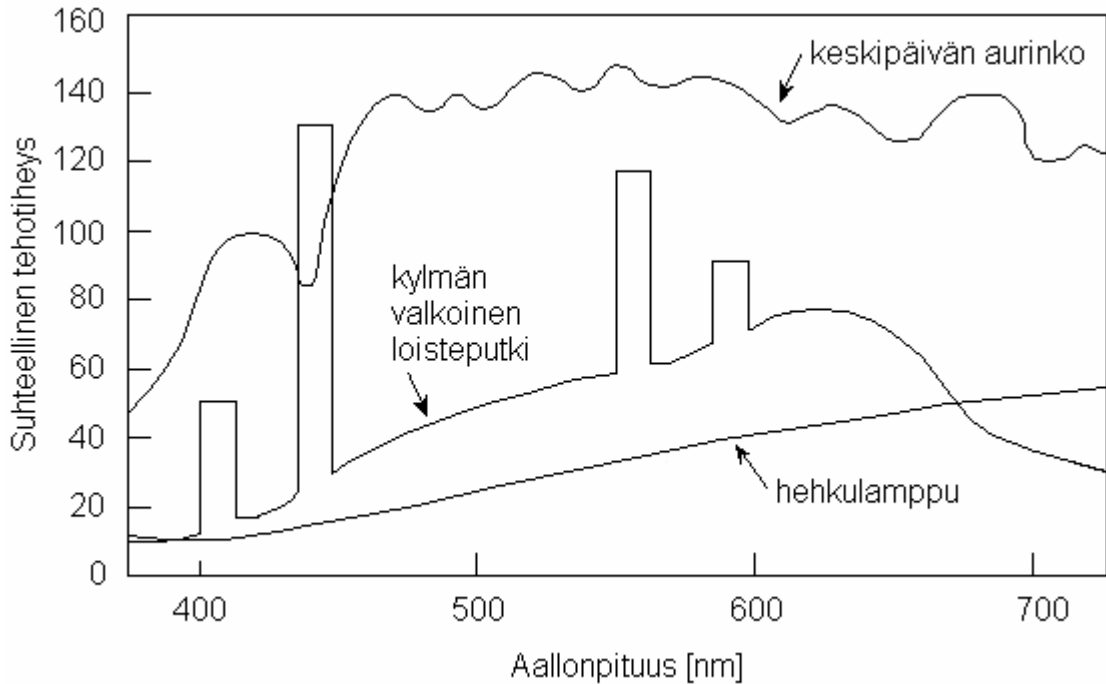


Kuva 1. Sähkömagneettisen säteilyn spektri. Näkyvä valo sijoittuu aallonpituusalueelle n. 400 - 780 nm.

2.1 Valonlähde

Ihmisen aivojen tuottama näköaistimus valaistavasta kohteesta riippuu silmään saapuvan valon spektrijakaumasta sekä silmän vasteesta valolle. Näköaistimuksen syntyminen vaatii siis valonlähteen, valaistavan kohteen ja vastaanottajan. Valonlähde voi olla luonnollinen tai keinotekoinen valonlähde. Keinovalojen säteily on peräisin jostakin fysikaalisesta aineesta. Valon tuottaminen perustuu monissa tapauksissa, kuten loisteputkissa, ultraviolettialueella olevan säteilyn muuttamisesta loisteaineiden avulla näkyvän valon

alueelle. Lähes poikkeuksetta valonlähteet säteilevät osittain myös infrapuna- ja ultraviolettisäteilyn alueella. Kuvassa 2 on esitetty keskipäivän auringon, hehkulampun ja kylmän valkoista valoa tuottavan loisteputken säteilyspektri (Halonen, 1992).



Kuva 2. Keskipäivän auringon, hehkulampun ja kylmän valkoista valoa tuottavan loisteputken säteilyspektri. Hehkulampun spektristä huomattava osa on infrapunasäteilyn alueella (OEE, 2006).

Valonlähteitä käsitellään radiometrisin eli säteilysuurein. Säteilysuureita on lukuisia, mutta tämän työn kannalta riittää tuntee säteilytehon spektritiheys $\Phi_e(\lambda)$ ja säteilyeksitanssin spektritiheys $M(\lambda)$. Säteilytehon spektritiheys määritellään

$$\Phi_e(\lambda) = \lim_{\Delta\lambda \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi_e}{\Delta\lambda}, \quad (1)$$

missä $\Delta\Phi_e$ on säteilyteho aallonpituuskaistalla $\Delta\lambda$. Valonlähteen kokonaissäteilyteho Φ_e saadaan siten integroimalla koko aallonpituuskaistan yli

$$\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_e(\lambda) d\lambda. \quad (2)$$

Säteilyeksitanssi M kuvaa kappaleen pinnan säteilemää tehoa säteilevän pinnan pinta-ala yksikköä kohti. Spektrinen säteilyeksitanssi $M(\lambda)$ saadaan spektrisestä säteilytehosta yhtälöllä

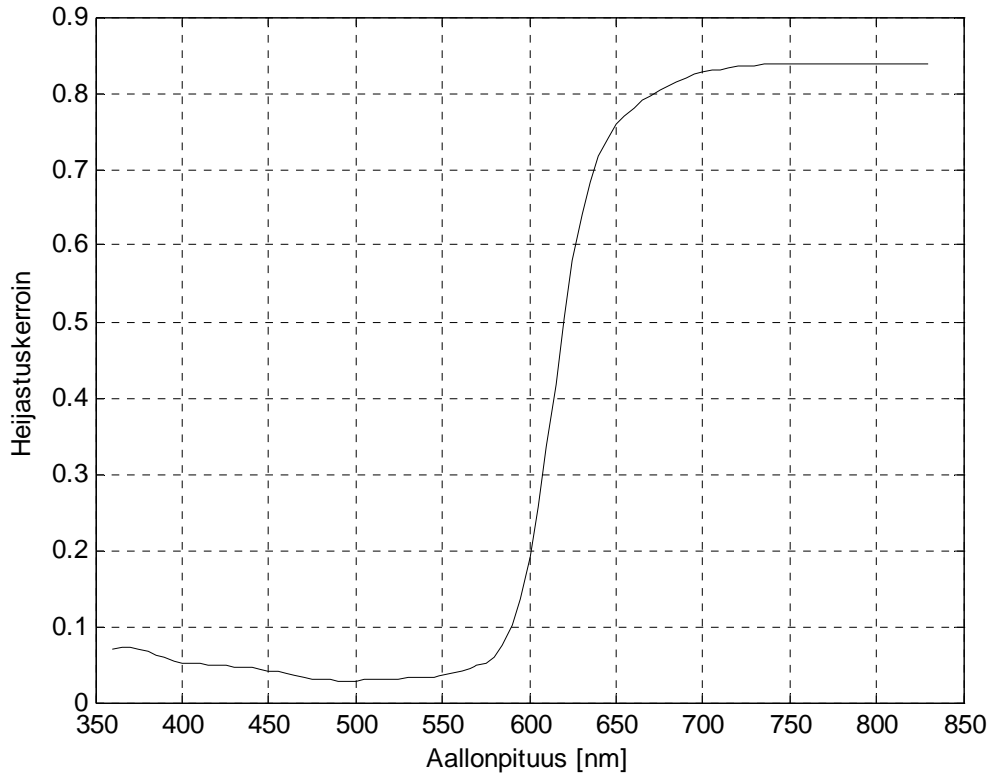
$$M(\lambda) = \frac{d\Phi_e(\lambda)}{dA}. \quad (3)$$

Säteilyeksitanssi saadaan integroimalla spektristä säteilyeksitanssia yli aallonpituuskaistan (Halonen, 1992)

$$M = \int_0^{\infty} M(\lambda) d\lambda. \quad (4)$$

2.2 Valaistava kohde

Valonlähteen tuottaman säteilyn osuessa valaistavaan kappaleeseen osa säteilystä heijastuu pois, osa läpäisee ja osa absorboituu pintaan. Silmään saapuvan säteilyn spektrijakauma saadaan selville kertomalla valonlähteen spektrijakauma valaistavan kohteen spektrisellä heijastuskertoimella $R(\lambda)$. Jos tarkastellaan läpinäkyvän kappaleen läpäisevää valoa, käytetään spektristä läpäisykerrointa $T(\lambda)$. Kuvassa 3 on esitetty erään punaiselta näyttävän läpinäkymättömän kappaleen heijastuskerroin aallonpituuden funktiona (Malacara, 2002).



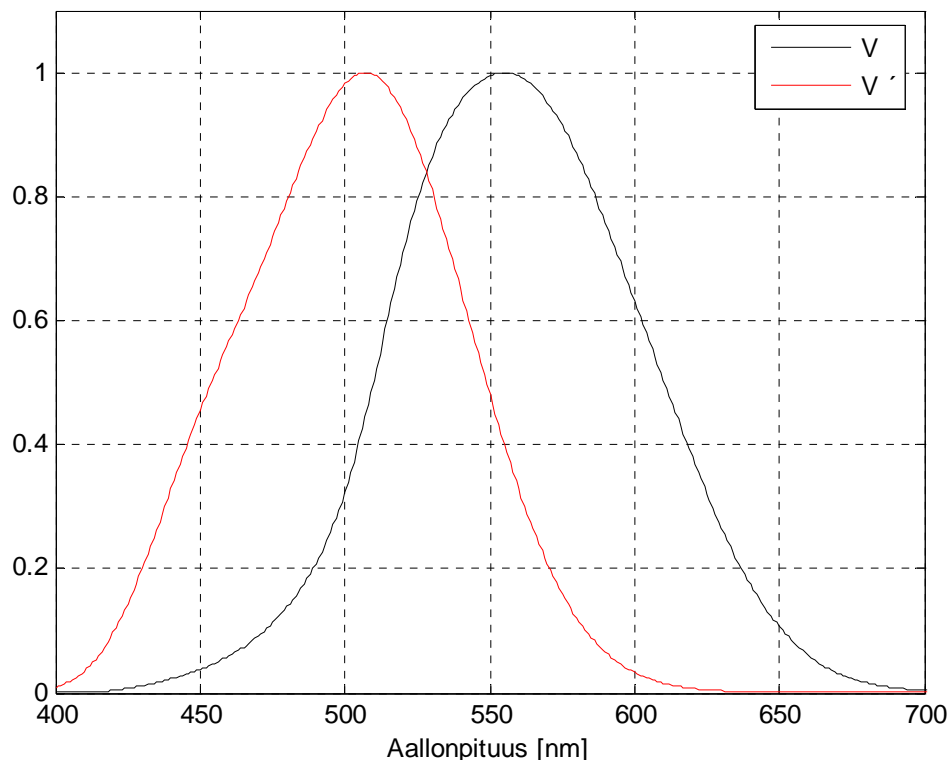
Kuva 3. Voimakkaan punaiselta näyttävän kappaleen heijastuskerroin aallonpituuden funktiona. Kappale heijastaa punaista valoa ja absorboi muut aallonpituudet. Heijastuskerroinspektri vastaa värintoistoindeksin laskentaan käytettävää yhdeksättä testinäytettä.

2.3 Vastaanottaja

Aivojen synnyttämän näköhavainnon syntyminen perustuu silmän verkkokalvolla sijaitsevien valoherkkien sauva- ja tappisolujen tuottamiin hermosignaaleihin. Sauvasolut vastaavat pimeänäkemisestä eivätkä ne pysty erottelemaan värejä. Tappisolut vastaavat päivänäkemisestä ja värien erottelusta. Tappisolut sijaitsevat pääosin lähellä näköakselia sijaitsevan keltatäplän alueella, jonka lähellä näkö on tarkimmillaan. Tarkan näön keskuksessa ei ole lainkaan sauvasoluja, jonka vuoksi tarkka näkeminen ei ole mahdollista hämärässä. Kauempana keltatäplästä sauvojen suhteellinen osuus verrattuna tappisoluihin lisääntyy (Halonen, 1992).

Tappisolut sisältävät eri väreille herkkiä pigmenttejä. Tappisoluja on kolmea eri tyyppiä, jotka ovat karkeasti ottaen herkkiä joko punaiselle, vihreälle tai siniselle valolle. Väriaistimus saa alkunsa erityyppisten tappisolujen erilaisesta ärsytyksestä. Aistimuksen voimakkuus eli värin kirkkaus riippuu aallonpituudesta kuvassa 4 esitetyn silmän

spektriherkkyyskäyrän $V(\lambda)$ mukaisesti. Tappinäkemisessä silmä on herkin aallonpituudelle 555 nm, joka on kellanvihreää valoa. $V'(\lambda)$ käyrä on määritetty heikossa valaistuksessa, jolloin näkeminen tapahtuu yksinomaan sauvasolujen avulla. Tällöin herkkuysmaksimi on aallonpituudella 507 nm (Halonen, 1992).



Kuva 4. Silmän spektriherkkyys aallonpituuden funktiona. Kirkkaassa valaistuksessa käytetään $V(\lambda)$ käyrää ja heikossa valaistuksessa $V'(\lambda)$ käyrää.

Silmän vastaanottamaa säteilyä käsitellään fotometrisin suurein. Fotometriset suureet ottavat huomioon vastaanottajan eli ihmissilmän ominaisuudet. Jokaiselle radiometriselle suurelle on olemassa vastaava fotometrinen suure. Radiometrasta säteilytehoa Φ_e vastaa valovirta Φ , joka saadaan silmän spektriherkkyyskäyrän avulla

$$\Phi = K_m \int_{380}^{770} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda, \quad (5)$$

missä $K_m = 683 \text{ lm/W}$ on valotehokkuusvakio. Valovirran yksikkö on lumen (lm) (Halonen, 1992).

3 VALON MATEMAATTINEN MALLINTAMINEN

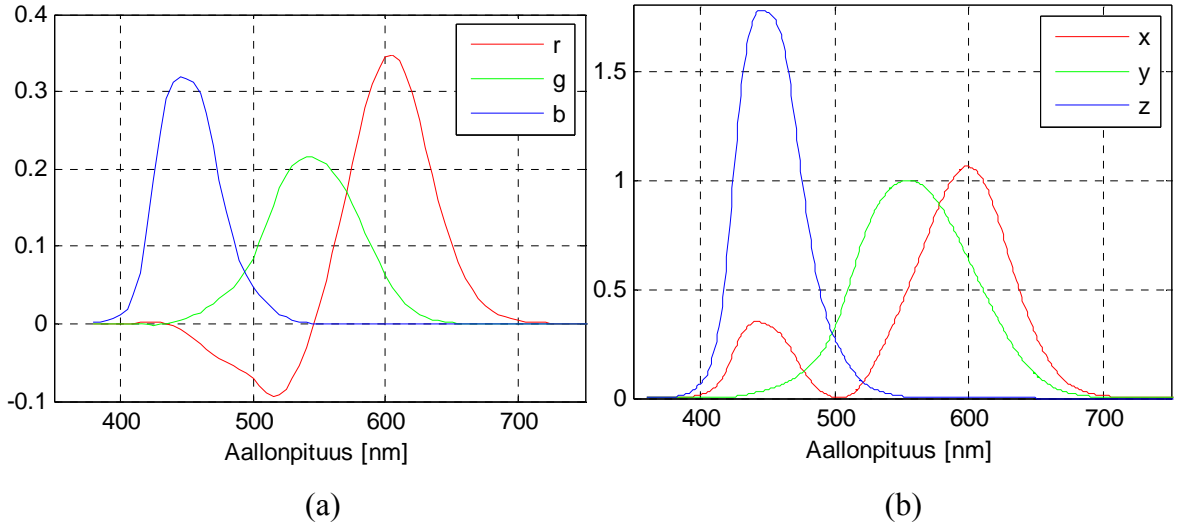
Tarkastellaan työn kannalta oleellisia värien ja erityisesti valkoisen valon matemaattiseen mallintamiseen ja mittaamiseen liittyviä käsitteitä.

3.1 Värikoordinaatistot

Värien mittaamisen ja väriaistin matemaattisen käsittelyn mahdollistamiseksi on kehitetty lukuisia eri värimalleja. Kansainvälinen valaistuskomissio (CIE) kehittää ja hallinnoi valaistukseen liittyviä teknisiä standardeja. Yleisin käytössä oleva värimalli on CIE:n vuoden 1931 standardihavaitsija. CIE on määritellyt myöhemmin muitakin värimalleja, mutta näiden suosio ei ole yhtä suuri. Kaikkien väriavaruuksien välillä on olemassa tunnetut muunnosyhtälöt.

3.1.1 CIE 1931 xyY

CIE:n vuoden 1931 standardihavaitsijan pohjana ovat kuvassa 5a esitetyt ihmisen värinäköön perustuvat värinsovitusfunktiot $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ ja $\bar{b}(\lambda)$. Värinsovitusfunktioita vastaavat monokromaattiset valonlähteet aallonpituuksilla 435.8 nm, 546.1 nm ja 700 nm. Värinsovitusfunktioiden arvot tietyllä aallonpituudella kuvaavat perusvärien suhteellisia arvoja, joilla näiden summaväri näyttää kyseisen aallonpituuden omaavalta monokromaattiselta valolta. Kokeessa näkökenttä jaettiin kahteen $2...3^\circ$ suuruiseen näkökenttään, joista toiseen tuotiin vertailuväri ja toiseen kolmen monokromaattisen perusvärin summa. Perusvärien voimakkuuksia säädettiin siten, että niiden summa näytti vertailuväriä. Funktioiden arvot on määritelty keskiarvoina 17 testihenkilön tekemien useiden mittaussarjojen tuloksista. Funktiot voivat saada negatiivisia arvoja mikä tarkoittaa, että vertailuväriin täytyisi lisätä kyseistä perusväriä. Lisäksi yhdistelmävärin voimakkuus riippuu kaikista funktioista. Vuoden 1931 standardihavaitsija määrittelee kuvassa 5b esitetyt värinsovitusfunktiot $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ ja $\bar{z}(\lambda)$, joissa edellä mainitut värien mallintamista haittaavat ominaisuudet on huomioitu. $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ ja $\bar{z}(\lambda)$ sovitusfunktiot saadaan lineaarimuunnoksella $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ ja $\bar{b}(\lambda)$ funktioista (Malacara, 2002).



Kuva 5. Värisovitusfunktiot (a) $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ ja (b) $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$. Oikean puoleisen kuvan funktioita käytetään kolmivärikomponenttien laskentaan.

$\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ ja $\bar{z}(\lambda)$ värisovitusfunktioiden avulla määritellään kolmivärikomponentit

$$X = \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} S(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \quad (6)$$

$$Y = \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} S(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \quad (7)$$

$$Z = \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} S(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda, \quad (8)$$

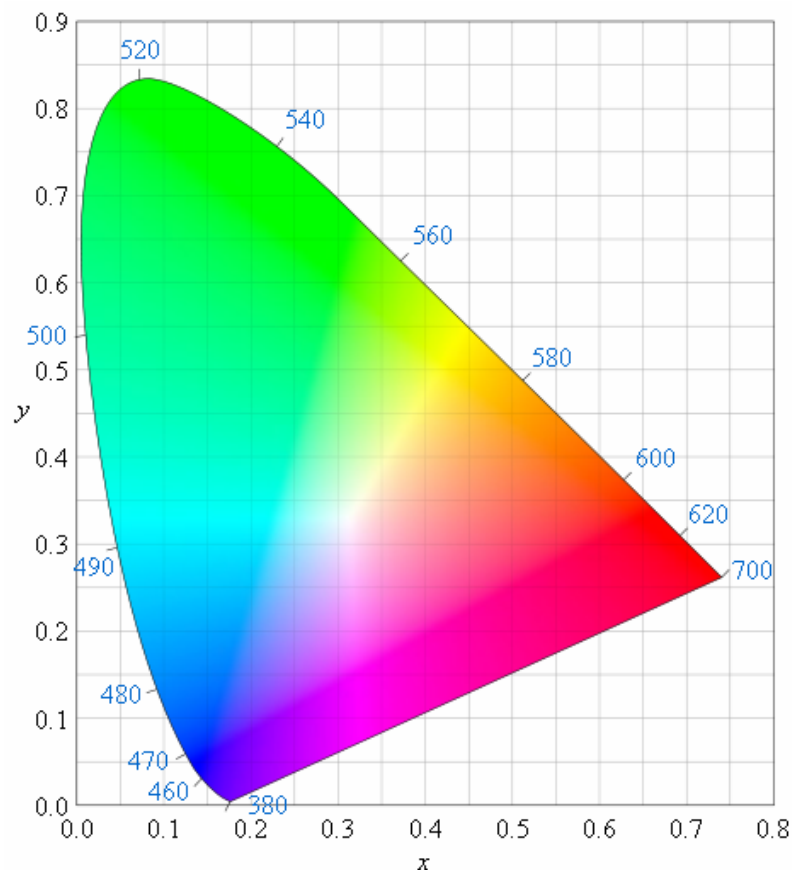
missä $S(\lambda)$ on valonlähteen tai pinnan radianssin, irradianssin, säteilytehon tai säteilyeksitanssin spektritiheys. Värisovitusfunktio $\bar{y}(\lambda)$ vastaa silmän herkkyysskäyrää $V(\lambda)$, joten kolmivärikomponentti Y sisältää tiedon valon kirkkaudesta. Jos integrointi tehdään säteilytehon spektritiheyden suhteen, on tällöin valovirran ja Y :n välillä yhteys $\Phi = K_m Y = 683Y$. Kolmivärikomponenteista saadaan määritettyä värikoordinaatit (x, y, z) yhtälöillä (Malacara, 2002)

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (9)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (10)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}. \quad (11)$$

Jokainen värikoordinaatti (x, y, z) vastaa tiettyä väriä. Värikoordinaattien perusteella voidaan piirtää kuvassa 6 esitetty värikartta. Värikoordinaatit esitetään tavallisesti muodossa (x, y, Y) , jolloin kaksi ensimmäistä koordinaattia kertoo värin ja kolmas värin kirkkauden. Yhtälöistä (6) - (11) voidaan havaita, että värikoordinaateista ei voida johtaa valonlähteen tai heijastavan pinnan säteilyn spektrijakaumaa. Toisin sanoen useammalla spektrijakaumalla voidaan saada aikaan sama väri. Tällaisia värejä nimitetään metameerisiksi väreiksi. Ilmiöllä on merkitystä mm. tarkasteltaessa valonlähteiden värintoisto-ominaisuuksia (Halonen, 2002).



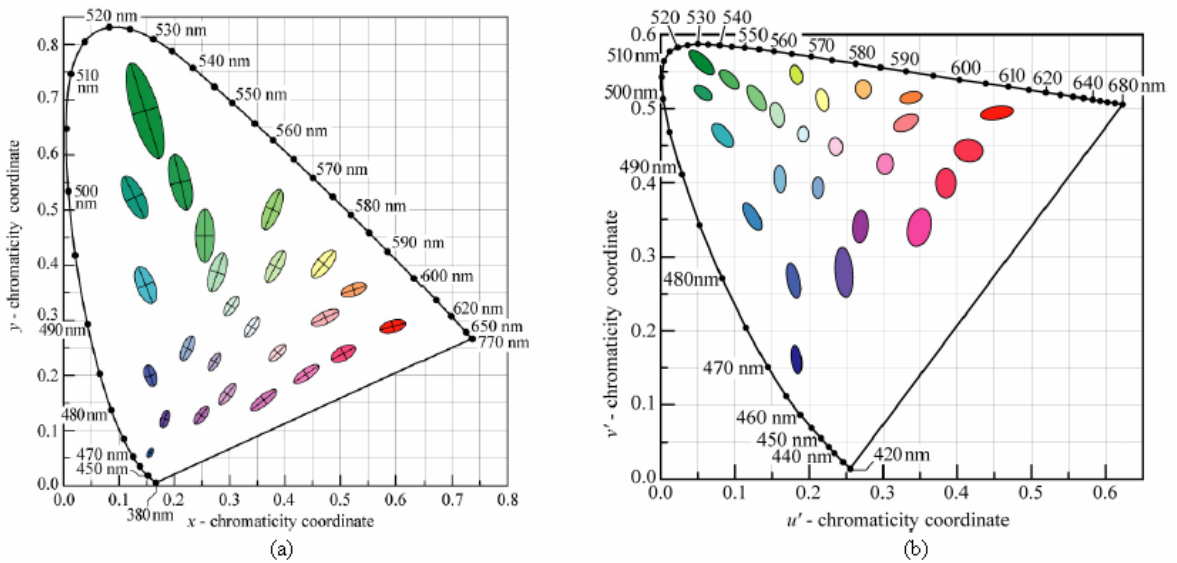
Kuva 6. CIE 1931 värikartta. Kuvion reunat muodostuvat monokromaattisista väreistä.

3.1.2 CIE 1976 $L^*u^*v^*$

Vuoden 1931 (x, y, Y) koordinaatiston suurin heikkous on, että pienin ihmissilmän havaitsema väriero ei ole vakio värikartalla, vaan se riippuu tarkasteltavasta väristä. Kuvassa 7a on esitetty ellipsejä, jotka kuvaavat kuinka kauaksi ellipsin keskipisteestä on siirryttävä ennen kuin värin havaitaan muuttuvan. Epäkohtaa on pyritty korjaamaan kuvan 7b CIE:n vuoden 1976 tasajakoisessa $L^*u^*v^*$ (CIELUV) väridiagrammissa. Kuvasta havaitaan tasajakoisuuden parantuneen selvästi. (u^*, v^*) koordinaatit saadaan (x, y) koordinaateista muunnoksilla (Halonen, 1992)

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad (12)$$

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} = \frac{9y}{-2x + 12y + 3} \quad (13)$$



Kuva 7. MacAdamsin ellipsejä (a) CIE 1931 ja (b) CIE 1976 värikartalla. Ellipsit on suurennettu kymmenkertaisiksi (Schubert, 2006).

Tasajakoisuuden ansiosta CIE:n vuoden 1976 värikoordinaatistoa käytetään arvioitaessa värin stabiilisuutta ajan, lämpötilan tai jonkun muun muuttujan suhteen. Stabiilisuuden tarkastelussa käytetään värikoordinaattiero Δu^*v^* , joka määritellään (Xiaohui, 2007)

$$\Delta u^*v^* = \sqrt{(u^* - u_0^*)^2 + (v^* - v_0^*)^2}, \quad (14)$$

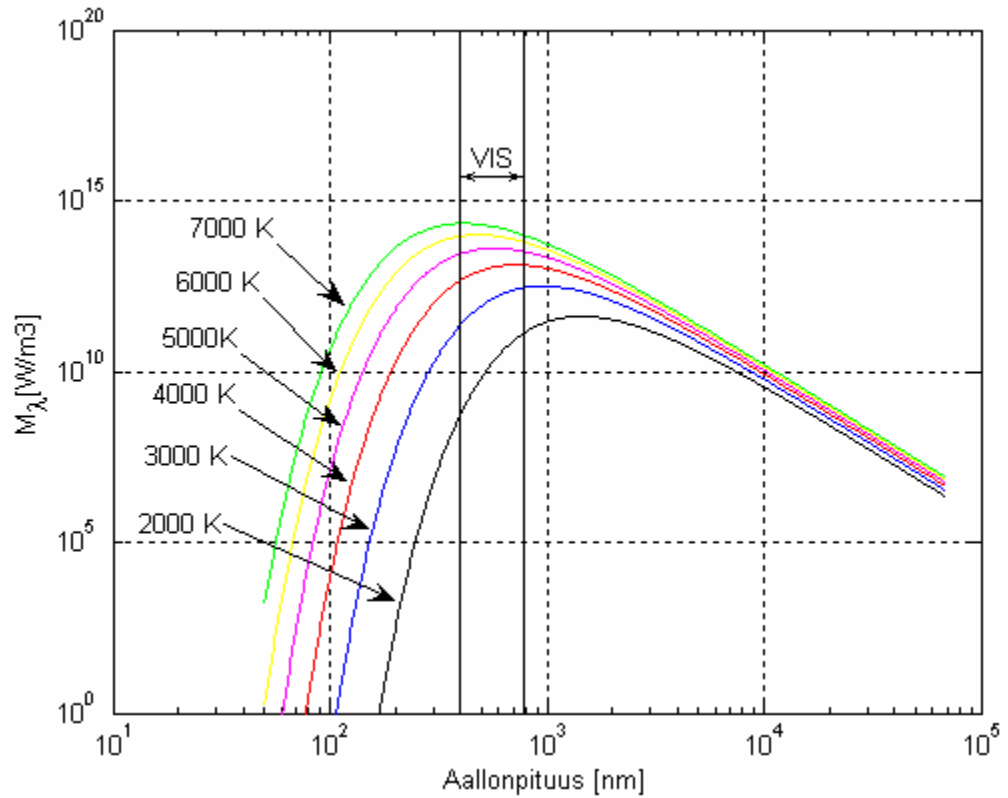
missä (u_0', v_0') on alkuperäinen värikoordinaattipiste. Pienin värikoordinaattiero, jonka ihminen kykenee havaitsemaan värimuutoksena, vaihtelee sovelluskohteesta riippuen väliltä 0.002 - 0.008 (Cypress, 2007), (Muthu, 2002a), (Xiaohui, 2007).

3.2 Väriämpötila

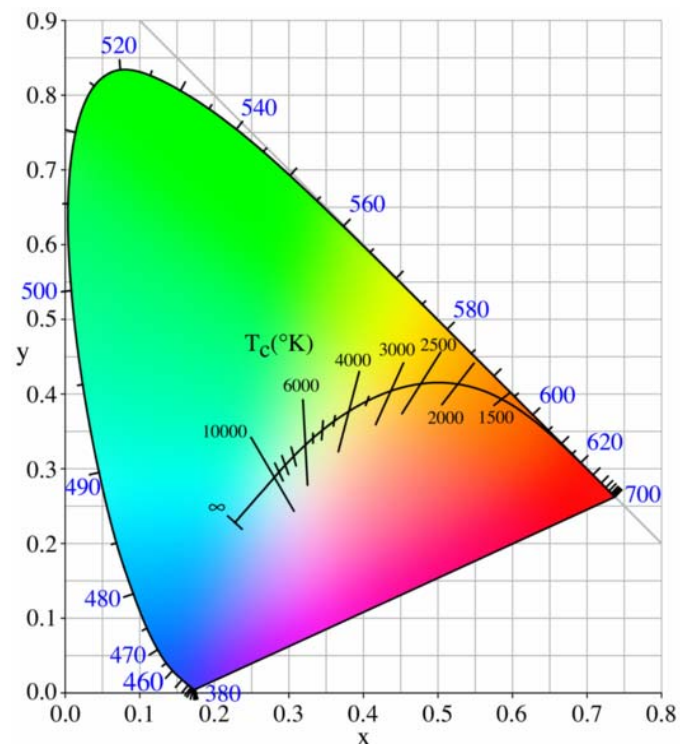
Jokainen kappale, jonka lämpötila poikkeaa absoluuttisesta nollapisteestä, emittoi sähkömagneettista säteilyä. Kappaletta, joka absorboi kaiken siihen kohdistuvan säteilyn, kutsutaan mustaksi kappaleeksi. Lämpötilassa 0 K musta kappale näyttää mustalle, koska se ei emittoi säteilyä. Lämpötilaa kasvatettaessa musta kappale alkaa emittoida sähkömagneettista säteilyä. Osa säteilystä on näkyvän valon alueella, lämpötilassa 1000 K musta kappale näyttää punaiselta, 1500 K keltaiselta, 2500 K kellertävän valkoiselta, 4500 K valkoiselta, 6000 K sinivalkoiselta ja 60000 K:n lämpötilassa siniseltä. Mustan kappaleen eli Planckin säteilijän säteilyeksitanssi noudattaa Planckin lakia

$$M(\lambda) = c_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1}, \quad (15)$$

missä c_1 ja c_2 ovat vakioita ja T kappaleen lämpötila kelvineissä. Kuvassa 8 on Planckin säteilijän säteilyeksitanssin spektritiheyskäyriä eri lämpötiloissa. Yhtälöillä (6) - (11) voidaan laskea Planckin säteilijän värikoordinaatit (x, y, Y) . Koordinaateista muodostuu värikartalle kuvan 9 mukainen käyrä (Malacara, 2002), (Halonen, 1992).



Kuva 8. Mustan kappaleen säteilijän säteily-spektrijä eri lämpötiloissa. Väriämpötiloilla 3700 - 7200 K säteilyhuippu osuu näkyvän valon alueelle.



Kuva 9. Mustan kappaleen säteilijä (x, y) värikoordinaatistossa. Poikkiviivat kuvaavat samaa ekvivalenttista väriämpötilaa.

Käsitettä värilämpötila käytetään kuvattaessa valkoisen valon eri sävyjä. Valonlähteen värilämpötila tarkoittaa sellaisen mustan kappaleen säteilijän lämpötilaa, jossa se näyttää samalle kuin valonlähde. Jos valonlähteen värikoordinaatit eivät osu tarkalleen mustan kappaleen säteilijän käyrälle, käytetään käsitettä ekvivalentti värilämpötila (CCT). Tällöin värilämpötila saadaan luettua kuvan 9 pystyviivojen avulla mustan kappaleen säteilijän käyrältä. Ekvivalentin värilämpötilan käsite on mielekäs vain, jos värikoordinaatit eivät poikkea merkittävästi vastaavan mustan kappaleen säteilijän värikoordinaateista (Halonen, 1992).

3.3 Värintoistoindeksi

Ihmisen kokema väriaistimus riippuu valonlähteestä, valaistavasta kohteesta ja silmän aivoille aiheuttamasta ärsykkeestä. Ihmisen kokema väriaistimus on subjektiivinen ilmiö minkä vuoksi sen yksiselitteinen mittaaminen on mahdotonta. Sen sijaan valonlähteen ja valaistavan kohteen yhteisvaikutusta voidaan mitata objektiivisesti.

Kaksi erilaisen säteilyspektrin omaavaa valonlähdettä näyttää samanvärisiltä, jos näiden värikoordinaatit ovat samat. Ilmiössä on kyse valonlähteiden metameriasta. Valaistaessa kappaletta heijastuvan valon spektrijakauma saadaan kertomalla valonlähteen säteilyspektri kappaleen heijastusspektrillä. Näin ollen sama kappale voi näyttää eriväriseltä, vaikka valonlähteet ovat samanvärisiä. Värintoistolla tarkoitetaan valaisimen kykyä toistaa valaistavan kohteen värit mahdollisimman luonnollisena (Halonen, 1992).

CIE:n vuoden 1974 värintoistoindeksi (CRI) eli R_a -indeksi kuvaa valonlähteen värintoist ominaisuuksia. Mitä suurempi indeksi on, sitä luonnollisemmalta valaistavat kohteet näyttävät. Menetelmässä verrataan standardoitujen testinäytteiden värien toistumista tarkasteltavassa valossa ja referenssivalossa. R_a -arvo määräytyy laskennallisesti testinäytteistä heijastuneiden valojen värikoordinaattieroista. Maksimi arvo on 100, joka saavutetaan valonlähteellä, jonka spektri vastaa täysin vertailulähdettä. Laskennan alussa määritetään tutkittavan valonlähteen värilämpötila kappaleessa 3.2 esitetyllä tavalla. Referenssilähde on 5000 K:n asti vastaavan lämpötilan Planckin säteilijä. Yli 5000 K:n värilämpötiloilla käytetään referenssinä luonnonvaloa mukailevaa CIE:n määrittelemän standardisarja D:n valonlähdettä. Testinäytteinä on yhteensä 15 kappaletta. Jokaiselle

testinäytteelle lasketaan värikoordinaattiero ΔE_i , joka kuvaa värinäytteestä heijastuneiden valojen koordinaattiero, kun kappaletta valaistetaan vuoronperään tutkittavalla valolla ja referenssilähteellä. Koordinaattien laskennassa käytetään CIE:n vuoden 1964 UCS järjestelmää. Jokaiselle värinäytteelle saadaan erikoisvärintoistoindeksi

$$R_i = 100 - 4.6\Delta E_i . \quad (16)$$

Yleinen värintoistoindeksi R_a lasketaan kahdeksan ensimmäisen erikoisvärintoistoindeksin keskiarvona (Schubert, 2006)

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i . \quad (17)$$

Taulukossa 1 on vertailtu eri valonlähteiden tyypillisiä värintoistoindeksejä. Yli 90 arvoa voidaan pitää erittäin hyvänä, joka soveltuu käytettäväksi esimerkiksi tekstiiliteollisuudessa. Toimistoihin ja kotitalouksiin arvoksi suositellaan yli 80. Yleiseen ulkovalaistukseen riittää alle 40:n R_a -arvo (ABB, 2000), (Muthu, 2002a).

Taulukko 1. Valonlähteiden tyypillisiä värintoistoindeksejä. Ledeillä päästän samaan luokkaan loistevalojen kanssa (Schubert, 2006), (OEE,2006).

	CRI
aurinko	100
hehkulamppu	100
halogeeni	100
loisteputki	60 - 90
valkoinen led	60 - 90
kolmiväri led	60 - 90
monimetallilamppu	65 - 90
natriumhöyrylamppu	40
elohopeahöyrylamppu	20 - 40

Värintoistoindeksiä on kritisoitu voimakkaasti, sillä useinkaan testihenkilöiden avulla tehtyjen värintoistoa mittaavien kokeiden lopputulokset eivät korreloi värintoistoindeksin

kanssa. Tämä pitää paikkansa erityisesti teräviä spektriipukkeja sisältävillä valonlähteillä kuten led- ja loistevalaisimilla (Ohno, 2004), (Narendran, 2002). Tällaisille valonlähteille on kehitteillä uusia värintoistoa mittaavia menetelmiä CIE:n ja muiden toimijoiden tahosta. Eräs näistä on NIST:n (National Institute of Standards and Technology) kehittämä CQS (Color Quality Scale), joka pyritään standardoimaan CIE:n toimesta (NIST, 2006). Tässä työssä tullaan kuitenkin käyttämään CRI-arvoa värintoiston arvioinnissa, koska tuotteiden markkinointi perustuu CRI-arvoon ja toisaalta uudempiä standardeja ei ole vielä saatavilla. Myöskään värintoiston arviointi testihenkilöiden avulla ei ole mahdollista tämän työn puitteissa.

3.4 Valotehokkuus

Eri valonlähteitä vertaillaan värintoisto-ominaisuuksien lisäksi energiataloudellisuudella. Valotehokkuus η_v kuvaa kuinka tehokkaasti valonlähde muuttaa sähkötehon valoksi. Valotehokkuus määritellään valonlähteen tuottaman valonvirran Φ ja sen kuluttaman sähkötehon P suhteena

$$\eta_v = \frac{\Phi}{P} = \frac{K_m \int \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{UI} . \quad (18)$$

Suurin osa valonlähteistä säteilee myös infrapuna- ja ultraviolettialueilla. Säteilyn valotehokkuus K on verrannollinen säteilytehon osuuteen näkyvän valon alueella. Säteilyn valotehokkuus määritellään

$$K = \frac{\Phi}{\Phi_e} = \frac{K_m \int \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int \Phi_e(\lambda) d\lambda} . \quad (19)$$

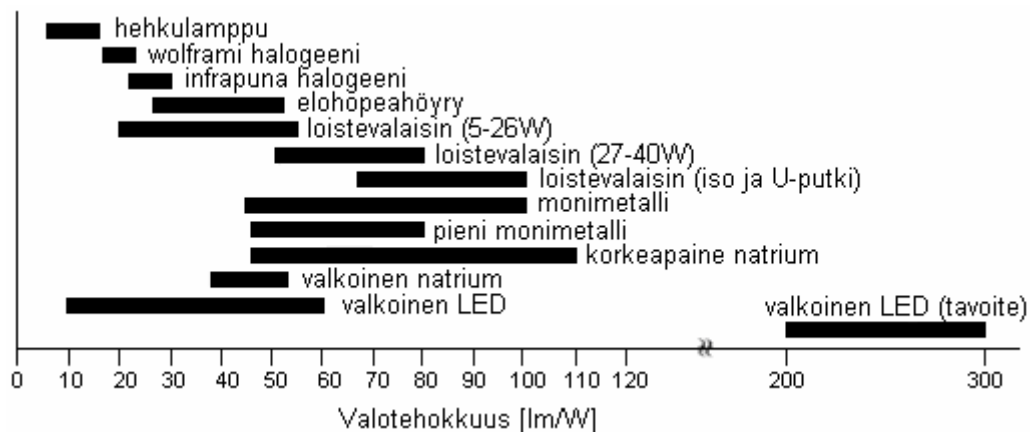
Molempien teoreettinen maksimiarvo on 683 lm/W, joka voidaan saavuttaa kun valonlähteenä on monokromaattinen keltavihreä valo aallonpituudella 555 nm. Käytännössä vain osa sähkötehosta pystytään muuttamaan säteilytehoksi. Näiden suhdetta nimitetään säteilyhyötysuhteeksi

$$\eta_e = \frac{\Phi_e}{P} = \frac{\int \Phi_e(\lambda) d\lambda}{UI} . \quad (20)$$

Valotehokkuuden ja säteilyn valotehokkuuden välillä on siten yhteys (Ohno, 2004)

$$\eta_v = \eta_e K . \quad (21)$$

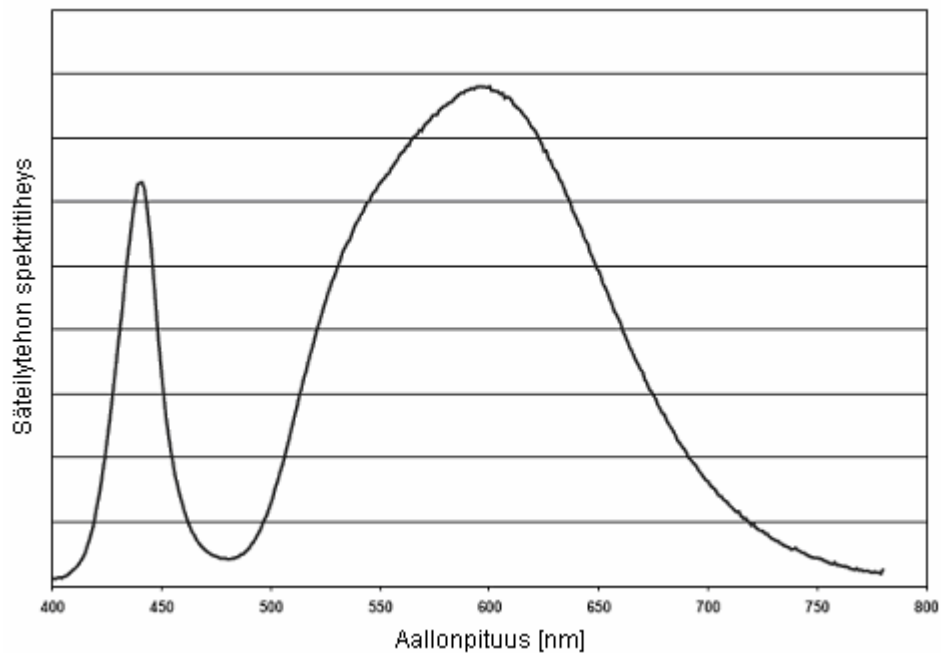
Kuvassa 10 on tyypillisiä valotehokkuuksia eri valaisintyypeille. Tavallisella hehkulampulla valotehokkuus on n. 16 lm/W, loisteputkella maksimissaan 100 lm/W ja nykyisillä valkoisilla ledeillä n. 30 - 60 lm/W. Tulevaisuudessa ledillä uskotaan päästävän luokkaan 200 - 300 lm/W. Teoreettinen maksimi on n. 400 lm/W (Ohno, 2006), (Pan, 2005).



Kuva 10. Tyypillisiä valotehokkuuksia eri valaisintyypeille. Nykyisillä led-valaisimilla on suurempi valotehokkuus kuin hehkulampuilla, mutta loistevalaisimien tasolle ei vielä päästä (Pan, 2005).

4 LED-TEKNIikka VALAISTUKSESSA

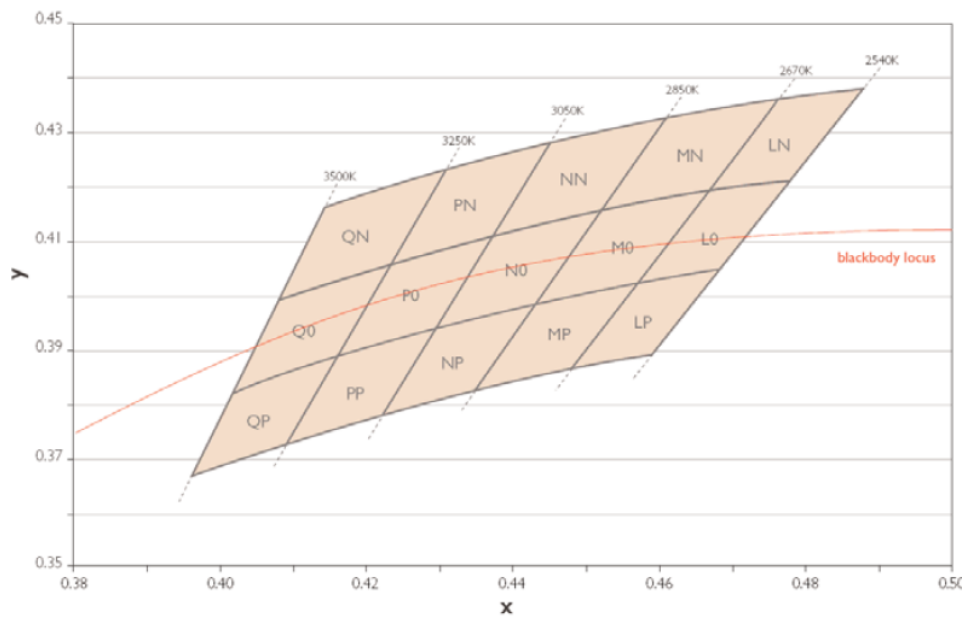
Ledeillä voidaan tuottaa valkoista valoa kahdella eri menetelmällä, joko valkoisella ledillä tai sekoittamalla useamman erivärisen ledin valoa. Valkoisen ledin valo synnytetään loisteaineiden avulla joko ultraviolettisäteilystä tai sinisestä valosta. Loisteaine muuntaa ultraviolettisäteilyn tai sinisen valon korkeammille näkyvän valon aallonpituuksille. Käytettäessä ultraviolettisäteilyä kaikki säteily johdetaan loisteaineen läpi. Siniseen valoon perustuvalla valkoisella ledillä spektrin sininen osa saadaan johtamalla osa säteilystä loisteaineen ohi. Muut aallonpituudet ovat loisteaineessa tapahtuvan reaktion tulosta. Kuvassa 11 on esitetty jälkimmäiseen tekniikkaan perustuvan valkoisen ledin spektri. Fluoresenssissa tapahtuva tehohäviö on suoraan verrannollinen taajuuden muutokseen. Näin ollen UV-säteilyyn perustuva led on valotehokkuudeltaan huonompi.



Kuva 11. Sävyltään lämpimän valkoisen ledin säteilyspektri. Sinisellä alueella oleva piikki on peräisin loisteaineen ohi johdetusta valosta (Philips, 2008).

Valkoisia ledejä on saatavilla eri sävyisinä. Esimerkiksi Philips Lumileds:n tarjoamassa LUXEON Rebel-sarjassa on valkoisia ledejä kolmen eri sävyisenä. Lämpimän valkoisen ledin värielämpötila on tyypillisesti 3100 K, neutraalin 4100 K ja kylmän valkoisen 6500 K. Näitä vastaavat tyypilliset värintoistoindeksit ovat 85, 75 ja 70. Valmistusteknisistä syistä ledien ominaisuudet vaihtelevat runsaasti eri yksilöiden välillä. Esimerkiksi lämpimän

valkoisen ledin ekvivalentti värilämpötila voi vaihdella valmistajan mukaan välillä 2540 - 3500 K. Led-valmistajat pienentävät ominaisuuksien vaihtelua ilmoittamalla ledeille ns. bin-koodin. Bin-koodia vastaa tietyn ominaisuuden vaihteluväliä, johon kyseinen ledi sijoittuu. Valkoisilla ledeillä bin-koodi ilmoitetaan valovirralla, kynnyksjännitteelle V_F ja värikoordinaateille (kuva 12). Värillisille ledeille ilmoitetaan värikoordinaattien sijaan dominoiva aallonpituus λ_D (Philips, 2008).

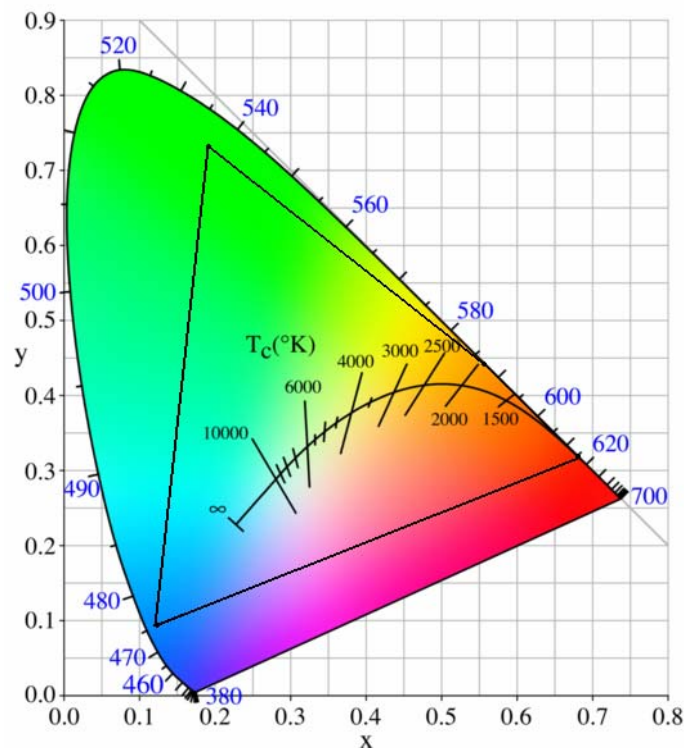


Kuva 12. Lämpimän valkoisen ledin värikoordinaattien bin-arvot. Tiettyä bin-arvoa vastaa tietty alue CIE 1931 värikoordinaatistossa (Philips, 2008).

Monimutkaisempi menetelmä valkoisen valon tuottoon on sekoittaa eriväristen ledien valoa. Värien sekoitus perustuu ledien kolmivärikomponenttien yhteenlaskuun ja kunkin ledin valovirran säätöön joko pulssinleveys- tai amplitudimodulaatiolla. Ledin spektrijakaumaa voidaan mallintaa toisen asteen Lorentz-jakaumalla (Muthu, 2002a), joka on muotoa

$$\Phi_e(\lambda) = c \left[1 + \left(\frac{\lambda - \lambda_p}{\gamma} \right)^2 \right]^{-2}, \quad (22)$$

missä c on valovirrassa riippuva vakio, λ_p huipun aallonpituus ja γ on skaalauskerroin. Spektrin puolileveyden $\Delta\lambda_{1/2}$ ja skaalauskerroimen välillä on yhteys $\gamma = 0.7769 \Delta\lambda_{1/2}$. Tyypillisesti spektrin puolileveys vaihtelee punaisen ledin 20 nm:n ja sinisen 33 nm:n välillä (Philips, 2008). Jokaiselle sekoitukseen käytettävälle ledille voidaan laskea spektrijakauman perusteella kolmivärikomponentit (X , Y , Z) ja edelleen (x, y) värikoordinaatit. Ledien värikoordinaateista muodostuu värikartalle monikulmio kuvassa 13 esitetyllä tavalla. Monikulmion sisään jäävä alue kuvaa värejä, jotka pystytään muodostamaan sekoittamalla ledien valoa sopivassa suhteessa (Malacara, 2002).



Kuva 13. Punaisen, vihreän, sinisen ja meripihkan värisen ledin värikoordinaatit. Nelikulmion rajaama alue kuvaa värejä, jotka pystytään muodostamaan sekoittamalla ledien valoa.

Kunkin ledin valovirtaa eli suhteellista intensiteettiä voidaan säätää joko pulssinleveysmodulaatiolla (PWM) tai säätämällä virran suuruutta. PWM:ssa virta on vakio, mutta lediä kytketään päälle ja pois riittävän suurella taajuudella, että silmä ei kykene havaitsemaan välkyntää. PWM-ohjauksessa kunkin ledin valovirran ja kolmivärikomponenttien suuruudet ovat suoraan verrannollisia kytkentäkertoimeen D eli

$$X = DX_{\max} \quad (23)$$

$$Y = DY_{\max} \quad (24)$$

$$Z = DZ_{\max} , \quad (25)$$

missä X_{\max} , Y_{\max} ja Z_{\max} ovat kolmivärikomponentit kun $D = 1$. Virtaohjaukselle ei voida esittää vastaavaa riippuvuutta, koska kolmivärikomponenttien ja virran välillä on epälineaarinen riippuvuus. Lisäksi riippuvuus on erilainen jokaisella kolmivärikomponentilla, koska ledin väri muuttuu virran suhteen. Virran kasvaessa säteilyn spektrihiippu siirtyy joko pienemmälle tai suuremmalle aallonpituudelle riippuen ledin materiaalista (Muthu, 2002a). Spektrihiipun siirtyminen johtaa värikoordinaattien muutokseen. PWM-ohjauksessa spektrihiipun paikka ei muutu, koska virta on vakio. Värien sekoituksen tuloksena saatavan valkoisen valon kolmivärikomponentit (X_{mix} , Y_{mix} , Z_{mix}) saadaan summaamalla kunkin ledin kolmivärikomponentit yhteen (Xiaohui, 2007)

$$X_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^N X_i \quad (26)$$

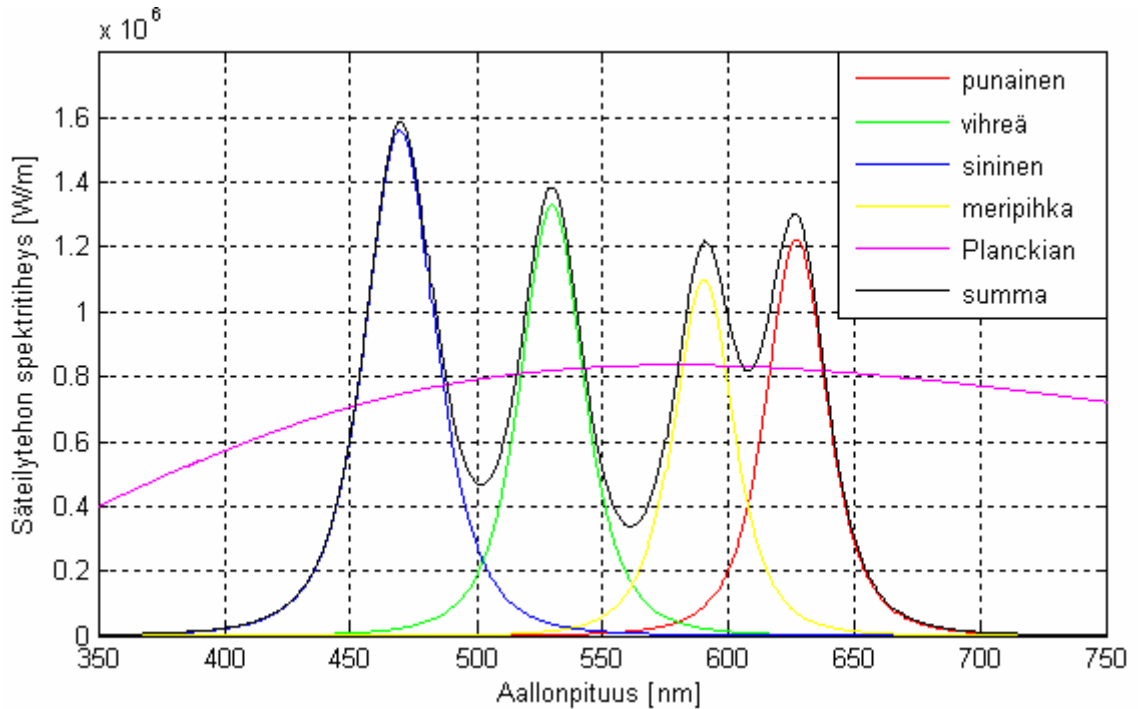
$$Y_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^N Y_i \quad (27)$$

$$Z_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^N Z_i . \quad (28)$$

Sekoitetun valon värikoordinaatit (x_{mix} , y_{mix}) saadaan laskettua edelleen yhtälöillä (9) ja (10). Kytkekertoimien laskemiseksi yhtälöt (23)- (28) voidaan esittää matriisimuodossa

$$\begin{bmatrix} X_{1,\max} & X_{2,\max} & \dots & X_{N,\max} \\ Y_{1,\max} & Y_{2,\max} & \dots & Y_{N,\max} \\ Z_{1,\max} & Z_{2,\max} & \dots & Z_{N,\max} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \dots \\ D_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{\text{mix}} \\ Y_{\text{mix}} \\ Z_{\text{mix}} \end{bmatrix} . \quad (29)$$

Kuvassa 14 on esitetty punaisella, vihreällä, sinisellä ja meripihkan värisellä ledillä muodostetun valkoisen valon ja vastaavan mustan kappaleen säteilijän spektrit. Valkoisen valon värilämpötilaksi on asetettu 5000 K ja valovirraksi 60 lm.

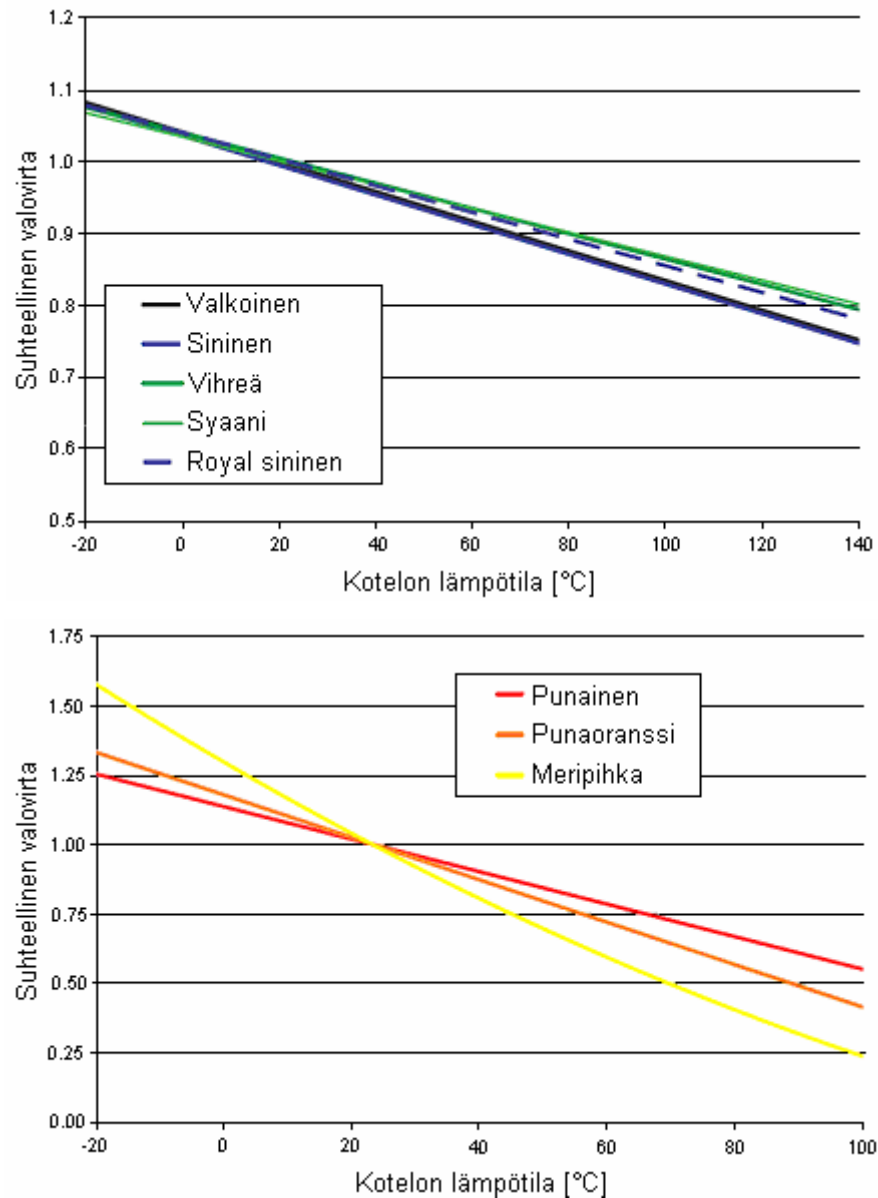


Kuva 14. Erivärisillä ledeillä muodostettu valkoinen valo. Ledien summaspektri tuottaa valkoista valoa, jonka värielämpötila on 5000 K. Värintoistoindeksiksi saadaan 85.

4.1 Lämpötila- ja aikariippuvat ominaisuudet

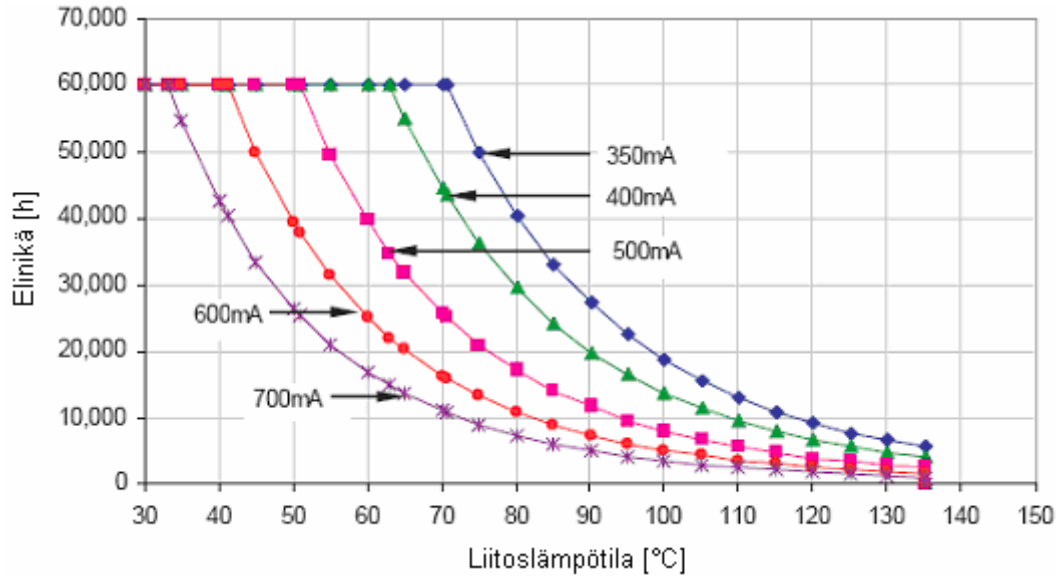
Valkoisen valon synnyttäminen edellisessä kappaleessa kuvatuilla menetelmillä on periaatteessa varsin yksinkertaista. Käytännössä asia ei ole näin, koska ledien sähköiset ja optiset ominaisuudet muuttuvat lämpötilan ja ajan funktiona. Lisähaasteen asettaa ominaisuuksien runsas vaihtelu eri yksilöiden välillä, vaikka käytössä olisikin samaa binkoodia olevia ledejä. Ominaisuuksien vaihtelu eri yksilöiden välillä pystytään kompensoimaan osittain valaisimen kalibrointivaiheessa.

Eniten ledien optisista ominaisuuksista lämpötilan ja ajan funktiona muuttuu valovirta. Kuvassa 15 on esitetty LUXEON Rebel-sarjan ledien valovirran suhteellinen muutos kotelon lämpötilan funktiona. Punaisten, punaoranssien ja meripihkan väristen ledien valovirran lämpötilariippuvuus on selkeästi suurempi kuin muiden. Tämä johtuu alumiini-gallium-indium-fosfidi (AlInGaP) materiaalista. Muissa väreissä käytetään indium-gallium-nitridia (InGaN) (Philips, 2008).



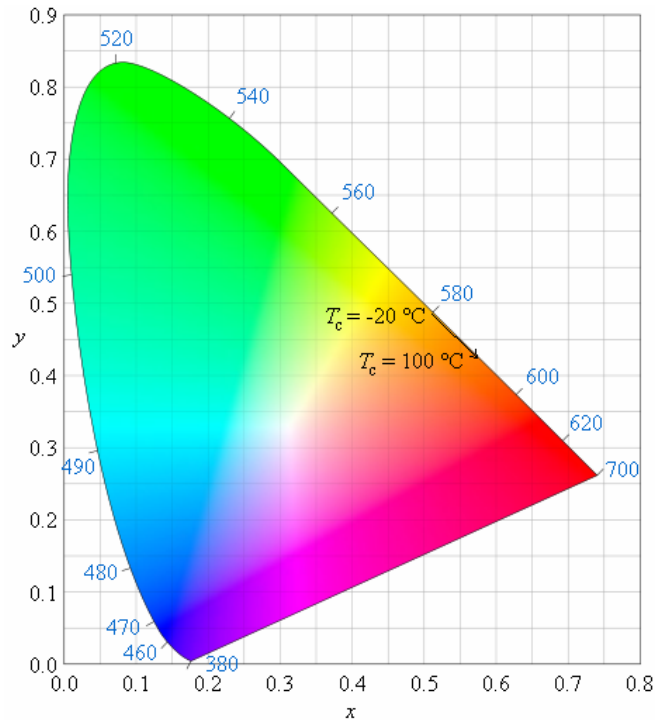
Kuva 15. Valovirran muutos lämpötilan funktiona. Meripihkan väristä lediä lukuun ottamatta valovirta pienenee lineaarisesti lämpötilan suhteen (Philips, 2008).

Ledin valovirta pienenee myös ledin ikääntyessä. Valmistajat julkaisevat kuvan 16 kaltaisia käyrästäjä, joita voidaan käyttää apuna suunnittelussa kun tehdään valintoja termisten ratkaisujen, käytettävän virran ja halutun eliniän välillä. Kuvasta on nähtävissä kuinka tärkeää on tehokkaan jäähdytyksen suunnittelu. Kuvan 16 ns. B10L70 käyrästä kuvaa elinaikaa, jolloin keskimäärin 10 % todennäköisyydellä ledin valovirta laskee alle 70 %:iin tietyllä liitoslämpötilalla T_j ja virralla I . Tyypillisesti ilmoitetaan B10L70:n lisäksi B50L70 käyrästä (Philips, 2007).



Kuva 16. B10L70 käyrästä LUXEON Rebel sarjan AlInGaP ledeille. Virran kasvaessa elinikä lyhenee oleellisesti (Philips, 2007).

Valovirran ja siten säteilyspektrin korkeuden lisäksi myös säteilyspektrin paikka ja muoto muuttuvat lämpötilan funktiona. Lämpötilan kasvaessa spektrin huippu siirtyy suuremmalle aallonpituudelle. Myös spektrin leveys voi muuttua hieman. Valmistajat ilmoittavat lämpötilakertoimen dominoivalle aallonpituudelle. Esimerkiksi LUXEON Rebel-sarjassa lämpötilakertoimet vaihtelevat syaanin 0.04 nm/K ja meripihkan 0.10 nm/K välillä. Kuvassa 17 on laskettu datalehden arvojen perusteella meripihkan väriselle ledille värikoordinaattien muutos kotelon lämpötilan funktiona (Philips, 2008).



Kuva 17. Meripihkan värisen ledin värikoordinaattien muutos kotelon lämpötilan funktiona. Muilla väreillä muutos on tätä pienempi.

Optisten ominaisuuksien lisäksi ledin kynnyksjännite riippuu lämpötilasta. Riippuvuus on tavallisen diodin tapaan lineaarinen n. - (2 - 4) mV/K. Yleensä muutoksesta ei ole haittaa, koska kynnyksjännitteellä ei ole suurta merkitystä ohjattaessa ledejä vakiovirtalähteellä. Riippuvuutta voidaan sen sijaan käyttää hyödyksi. Kynnyksjännitteen voidaan olettaa riippuvan ainoastaan liitoslämpötilasta, jos virta on vakio. Mittaamalla kynnyksjännitettä saadaan tieto liitoslämpötilasta ja siten ledin optisista ominaisuuksista (Philips, 2008), (Xiaohui, 2007).

4.2 Takaisinkytkentämenetelmät

Monissa valaistuskohdeissa katsoja näkee yhtä aikaa useamman eri led-valaisimen tuottamaa valoa. Katsoja pystyy erottamaan sävyeroja valaisimien välillä, jos näiden väriero on riittävän suuri. Vaikka valaisimet kalibroidaan tuottamaan samansävyistä valkoista valoa, syntyy näiden välille kuitenkin kirkkaus- ja värieroja ajan ja lämpötilan suhteen. Väriin stabiilisuuden kannalta on oleellista kompensoida optisten ominaisuuksien muutokset takaisinkytkentään perustuvalla säätömenetelmällä. Säätö voidaan toteuttaa joko optisella tai liitoslämpötilaan perustuvalla takaisinkytkennällä. Käytettäessä valkoisia

ledejä pystytään kompensoimaan vain valovirran muutokset. Sen sijaan sekoittamalla useamman erivärisen ledin valoa pystytään ottamaan huomioon myös värimuutokset. Tämän vuoksi sekoitusmenetelmä on suositumpi sovelluksissa, joissa värin stabiilisuus on tärkeää. Esitellään seuraavaksi takaisinkytkentämenetelmät, kun valkoinen valo tuotetaan erivärisillä ledeillä.

4.2.1 Liitoslämpötilakompensointi

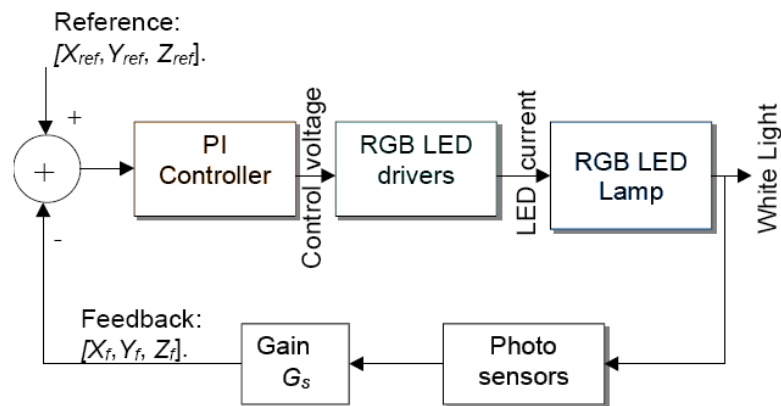
Liitoslämpötilakompensointi perustuu liitoslämpötilan mittaamiseen. Kun liitoslämpötila tunnetaan, voidaan kunkin ledin kolmivärikomponentit päivittää kyseistä liitoslämpötilaa vastaavaksi. Tämän jälkeen kytkentäkertoimet päivitetään ratkaisemalla yhtälöstä (29). Liitoslämpötilan ja kolmivärikomponenttien vastaavuus selvitetään joko datalehden tai kalibrointimittauksien perusteella. Mittaamalla tehtävä kalibrointi on luonnollisesti tarkempi. Menetelmä vie kuitenkin paljon aikaa ja resursseja. Liitoslämpötila voidaan mitata piirilevyn pinnasta esimerkiksi termistorilla. Liitoslämpötila saadaan laskettua piirilevyn ja liitoksen välisen lämpöresistanssin θ_{jb} avulla

$$T_j = T_b + \theta_{jb} IV_F, \quad (30)$$

missä T_b on piirilevyn lämpötila. Yksinkertaisempi ja halvempi menetelmä on mitata ledin kynnysjännitettä. Kynnysjännitteen avulla saadaan tieto ledin optisista ominaisuuksista, koska kynnysjännite riippuu liitoslämpötilasta (Xiaohui, 2007).

4.2.2 Optinen takaisinkytkentä

Kuvassa 18 on esitetty eräs optiseen takaisinkytkentään perustuva säätöjärjestelmä. Optinen takaisinkytkentä perustuu RGB-värisensoriin, jolla mitataan ledien tuottamaa valoa. Värisensori koostuu kolmesta erilaisesta fotodiodista, joiden vasteet sijoittuvat punaisen, vihreän ja sinisen valon alueelle. Kun fotodiodien vasteet tunnetaan, pystytään fotodiodien tuottamien signaaleiden avulla laskemaan valon kolmivärikomponentit. Haluttujen ja mitattujen kolmivärikomponenttien erotus viedään PI-säätäjälle. PI-säätäjän lähtösignaaleiden avulla lasketaan ledien kytkentäkertoimet yhtälöllä (29) (Muthu, 2002b).

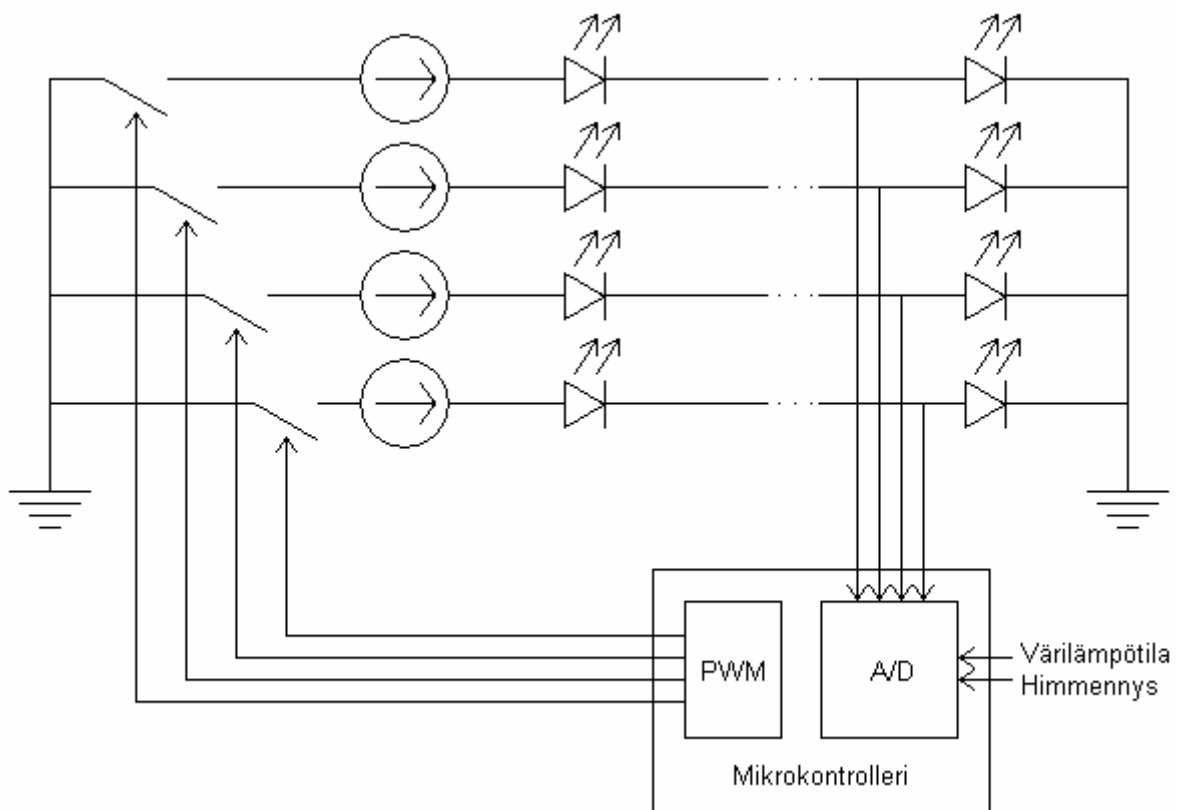


Kuva 18. RGB led-ryhmän optiseen takaisinkytkentään perustuva säätöjärjestelmä. Värisensorilla mitataan valon spektrijakaumaa (Muthu, 2002b).

Liitoslämpötilakompensoinnin suurin heikkous on, että se ei pysty huomioimaan ledien ikääntymistä. Optinen takaisinkytkentä sen sijaan huomioi ikääntymisestä johtuvan valovirran pienenemisen. Ajan myötä säädön tarkkuus kuitenkin heikkenee, koska myös värisensorin vaste muuttuu vanhetessa. Värisensorin vastespektri muuttuu myös lämpötilan funktiona. Lämpötilan vaikutus voidaan ottaa huomioon yhdistämällä säätöön lämpötilakompensointi. Kolmivärikomponentit lasketaan sensorin ulostuloista muunnosmatriisin avulla, jonka kertoimia päivitetään liitoslämpötilan mukaan (Muthu, 2003). Yleisesti optisella takaisinkytkennällä toteutetun säätöjärjestelmän suunnittelu on hankalaa, koska järjestelmän eri osien tarkka mallinnus on vaikeaa epälineaarisuuden, parametrivaihteluiden sekä lämpötila- ja aikariippuvuuden takia. Ongelmaksi voi muodostua myös värisensorin fyysinen sijoitus. Sensorin tulisi mitata samaa valoa, jonka katsoja näkee olematta kuitenkaan esteenä näkökentässä (Muthu, 2002b).

5 MIKROKONTROLLERIOHJAUS

Suunnitellaan mikrokontrolleriohjaus led-valaisimelle, jonka väriämpötilaa ja himmennystä voidaan säätää reaaliaikaisesti. Valon väriämpötilaa on mahdollista säätää välillä 2500 K - 7000 K ja himmennystä välillä 0 - 90 %. Valkoinen valo tuotetaan sekoittamalla punaisten, vihreiden, sinisten ja meripihkan väristen ledien valoa. Ledien ohjaukseen käytetään PWM:ää, jolloin kolmivärikomponenttien ja kytkentäkertoimien välillä on yhtälöiden (23)-(25) mukainen lineaarinen riippuvuus. Mikrokontrolleriohjauksen testaamista varten rakennettiin kuvan 19 mukainen prototyyppi. Prototyyppi sisältää neljä led-riviä, joissa kussakin on 10 lediä sarjassa. Yksittäistä riviä syötetään vakiovirtalähteellä, jonka *enable* -tuloon tuodaan mikrokontrollerilla saatava 5 V:n logiikkasignaali. Himmennys- ja sävynsäätö on toteutettu säätöpotentiometrien ja A/D-muuntimen avulla.



Kuva 19. Mikrokontrolleriohjaus led-valaisimelle. A/D muuntimella mitataan kynnysjännitteet ja luetaan käyttäjän säätämä kirkkaus ja väriämpötila.

5.1 Ledien PWM-ohjaus

Led-rivien kytkentäkertoimien laskenta perustuu matriisiyhtälöön (29). Yhtälöstä nähdään, että neljällä erivärisellä ledillä yhtälöllä on äärettömän monta ratkaisua. Sama voidaan todeta kuvan 14 värikartalta. Kuvasta nähdään, että lähes kaikkien valkoisen eri sävyjen muodostamiseen riittää punainen, vihreä ja sininen ledi. Jotta kytkentäkertoimien laskenta voidaan tehdä yhtälöllä (29), täytyy yksi neljästä kytkentäkertoimesta määrätä muulla menetelmällä. Neljännen värin lisääminen tuo suunnitteluun vapausasteen optimoida valaisimen ominaisuudet mahdollisimman hyvän valotehokkuuden ja värintoisto-ominaisuuksien välillä. Kolmella ledillä näihin ei pystytä vaikuttamaan hallitusti, koska yhtälöllä (29) on vain yksi ratkaisu ja siten tietty valotehokkuus ja värintoistoindeksi. Kolmella ledillä haluttuihin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa ainoastaan ledien valinnalla.

Valaisimien värintoisto-ominaisuudet ja valotehokkuus ovat ristiriidassa keskenään. Jos halutaan mahdollisimman hyvä värintoisto, pitäisi valaisimen spektrin jäljitellä mahdollisimman tarkkaan mustan kappaleen säteilijän spektriä. Jos halutaan mahdollisimman suuri valotehokkuus, tulisi spektrin keskittyä mahdollisimman lähelle silmän spektriherkkyyden maksimia 555 nm. Käytetään neljännen led-rivin tuoma vapausaste tuottamaan valaisimelle mahdollisimman hyvät värintoisto-ominaisuudet. Määritetään meripihkan väriselle led-riville optimaalinen valovirta suhteessa sekoitetun värin valovirtaan Y_a/Y_{mix} . Optimointia varten spektrofotometrillä mitataan erikseen jokaisen led-rivin säteilyspektri. Mitattujen säteilyspektrien avulla määritetään optimaalinen arvo käyttäen kappaleessa 3.3 esitettyä värintoistoindeksin laskentamenetelmää. Optimointi tehdään koko säädettävissä olevalle väriämpötila-alueelle 2500 K - 7000 K. Tulokset tallennetaan hakutaulukkoon mikrokontrollerin ROM:iin (Read Only Memory). Suhdearvon avulla lasketaan kytkentäkerroin meripihkan väriselle led-riville, kun tiedetään liitoslämpötilasta riippuva $Y_{a,\text{max}}$ ja väriämpötilasta riippuva Y_{mix} . Tällä tavoin huomioidaan liitoslämpötilan vaikutus kytkentäkertoimeen. Vastaavalla tavalla menettelemällä vapausaste voitaisiin haluttaessa käyttää esimerkiksi valotehokkuuden maksimointiin.

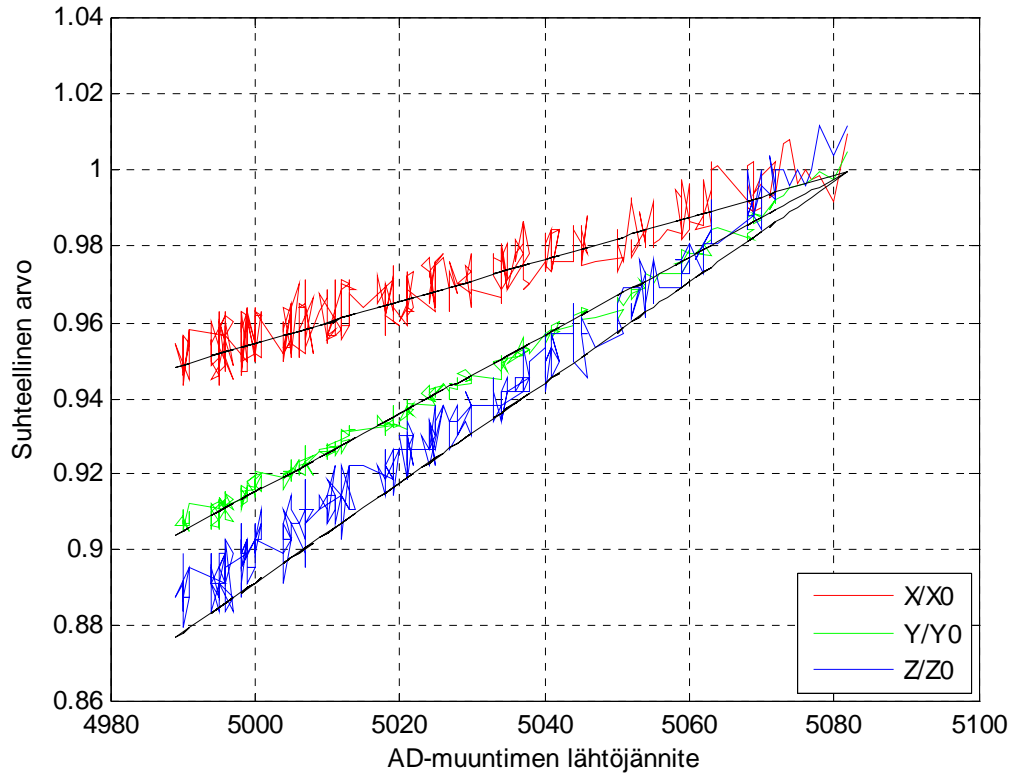
5.2 Lämpötilakompensointi

Ledien liitoslämpötilojen muutoksista aiheutuvat optisten ominaisuuksien muutokset kompensoidaan käyttäen takaisinkytkentänä ledien kynnyksjännitteitä. (Xiaohui, 2007) on esittänyt vastaavan kompensointimenetelmän RGB led-ryhmälle. Ledin kynnyksjännitteen voidaan olettaa riippuvan ainoastaan liitoslämpötilasta, koska ledejä ajetaan vakiovirralla. Ledin optisten ominaisuuksien voidaan olettaa muuttuvan liitoslämpötilan mukaan. Täten kynnyksjännitteen ja optisten ominaisuuksien välillä on suora yhteys. Ledien kytkentäkertoimien ratkaisemiseksi tarvitaan kunkin ledin kolmivärikomponentit. Lämpötilakompensointi päivittää jokaisen ledin kolmivärikomponentit vastaamaan nykyistä liitoslämpötilaa. Päivityksen jälkeen kytkentäkertoimet lasketaan käyttäen uusia kolmivärikomponentteja.

Kynnyksjännitteen mittaukseen perustuva takaisinkytkentä ei pysty huomioimaan ledien ikääntymistä. Ledin ikääntyminen riippuu ledin materiaaliominaisuuksien lisäksi kuormituksesta, jäähdytysratkaisusta ja ympäristön lämpötilasta. Eriväriset ledit ikääntyvät siten eri nopeudella, mikä heikentää lämpötilakompensoinnin tarkkuutta. Säädon toimivuutta ajan suhteen pystytään parantamaan hidastamalla ledien ikääntymistä tehokkaalla jäähdytyksellä ja ajamalla ledejä riittävän matalalla virralla.

5.2.1 Kalibrointimittaukset

Kynnyksjännitteen ja kolmivärikomponenttien välinen riippuvuus kullekin led-riville saadaan mitattua spektrofotometrin avulla. Mittauksessa ei ole tarvetta tietää todellisen liitoslämpötilan ja kynnyksjännitteen arvoa. Mikrokontrolleriohjauksen suunnittelun kannalta riittää tieto mikrokontrollerin AD-muuntimen tuottaman digitaalisen kynnyksjännitteen ja kolmivärikomponenttien riippuvuudesta. Kalibrointimittauksessa spektrofotometrillä mitattiin säteilyspektri ja A/D-muuntimella vastaava kynnyksjännite. Liitoslämpötilaa muutetaan lämmittämällä jäähdytyslementtiä. Kolmivärikomponentit saadaan laskettua säteilyspektristä yhtälöillä (6) - (8). Kuvassa 20 on esitetty vihreän led-rivin mitatut kolmivärikomponentit AD-muuntimen lähdön funktiona.



Kuva 20. Vihreän led-rivin suhteelliset kolmivärikomponentit kynnyksjännitteen funktiona. Vertailupisteenä on huoneenlämpötila.

Kuvasta 20 nähdään, että kolmivärikomponenttien ja kynnyksjännitteen välinen riippuvuus on likimain lineaarinen. Sovitetaan mittausdataan suora pienimmän neliösumman menetelmällä. Tällöin kolmivärikomponenteille voidaan kirjoittaa yhtälöt

$$X_{\max} = a_X V_F + b_X \quad (31)$$

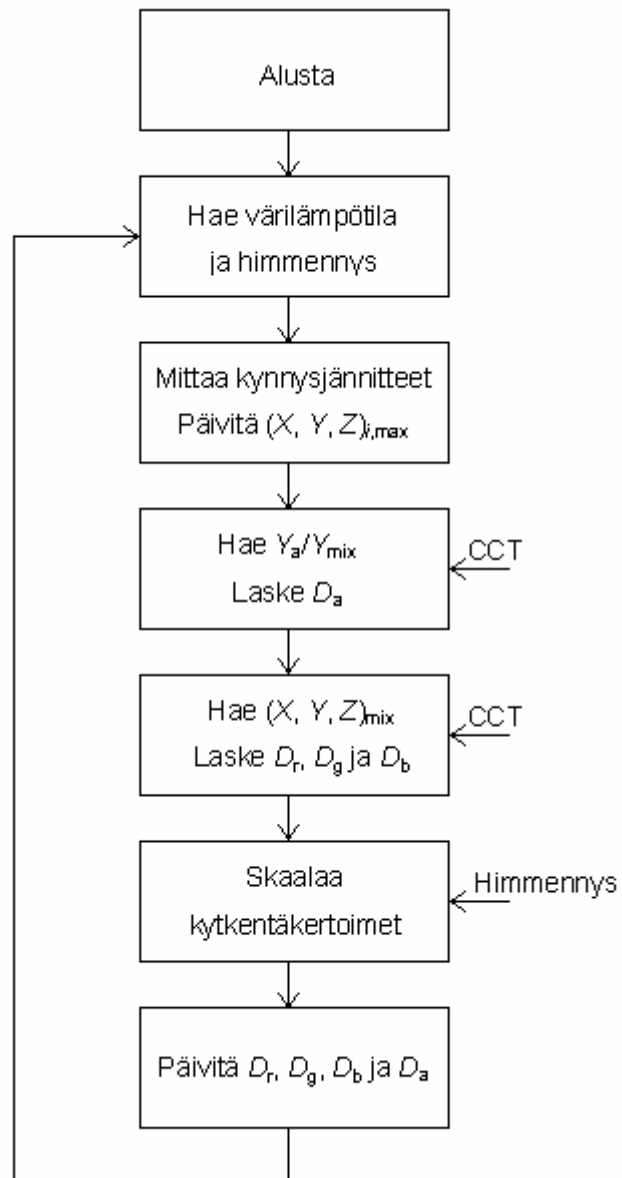
$$Y_{\max} = a_Y V_F + b_Y \quad (32)$$

$$Z_{\max} = a_Z V_F + b_Z. \quad (33)$$

Yhtälöitä käytetään kolmivärikomponenttien päivittämiseen. Aluksi mitataan kynnyksjännite AD-muuntimella, jonka jälkeen ROM-muistiin tallennettujen kertoimien avulla lasketaan uudet kolmivärikomponentit. Toimenpide toistetaan jokaiselle led-riville.

5.3 Mikrokontrollerin pääohjelma

Kuvassa 21 on esitetty mikrokontrollerin pääohjelma lohkokaaavioesityksenä. Laitteen käynnistyksessä alustetaan muuttujat ja otetaan käyttöön tarvittavat ominaisuudet. Tämän jälkeen luetaan A/D-muuntimelta käyttäjän asettama väriämpötila ja himmennys. Lämpötilakompensointialiohjelmassa mitataan kunkin led-rivin kynnysjännitteet ja päivitetään kolmivärikomponenttien arvot yhtälöiden (31) - (33) mukaisesti. Seuraavaksi lasketaan meripihkan värisen led-rivin kytkentäkerroin D_a , kun väriämpötilan perusteella tiedetään Y_a/Y_{mix} ja lämpötilakompensointialiohjelmasta saadaan $Y_{a,\text{max}}$. Sekoitettun värin kolmivärikomponentit määräytyvät väriämpötilan perusteella. Tällöin matriisiyhtälö (29) supistuu muotoon josta saadaan ratkaistua loput kolme kytkentäkerrointa. Kytkentäkertoimet skaalataan siten, että suurin saa arvon yksi. Tämän jälkeen ne skaalataan vielä himmennystä vastaavalla kertoimella. Pääohjelman lopuksi päivitetään uudet kytkentäkertoimet PWM-lohkoille ja siirrytään takaisin silmukan alkuun. Jokainen aliohjelma palauttaa tiedon suorituksessa tapahtuneista virheistä, jonka perusteella tehdään virhettä vastaavat korjaustoimenpiteet.



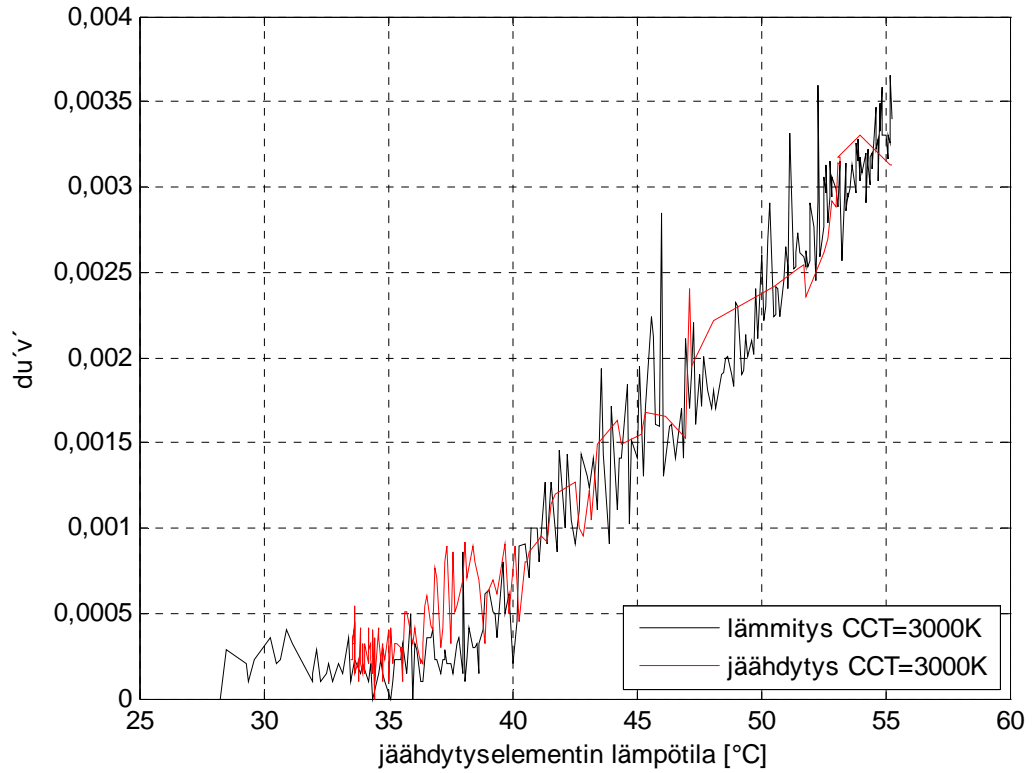
Kuva 21. Mikrokontrollerin pääohjelman rakenne. Ohjelma käy läpi silmukkaa, jossa luetaan haluttu himmennys ja väriämpötila sekä tehdään lämpötilakompensointi ja kytkentäkertoimien päivitys.

6 MITTAUSTULOKSET

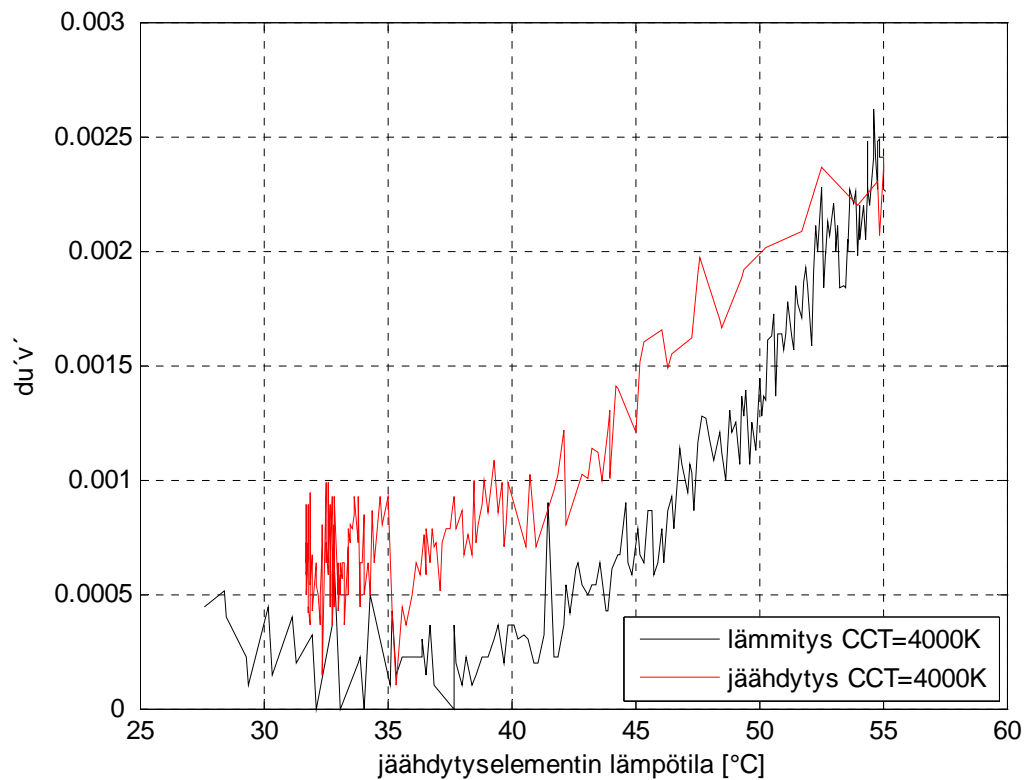
Mikrokontrolleriohjatulle valaisimelle tehtiin mittauksia, joiden avulla todettiin valaisimelle asetettujen vaatimuksien, mahdollisimman hyvän värintoiston ja valon stabiilisuuden, toteutuminen. Värintoisto-ominaisuuksien arviointiin käytettiin värintoistoindeksiä. Valon stabiilisuutta tarkasteltiin värikoordinaattien avulla CIE:n vuoden 1976 tasajakoisessa värikoordinaatistossa. Molemmat mittaukset tehtiin sekä lämpötilan että ajan suhteen.

6.1 Valon stabiilisuus lämpötilan suhteen

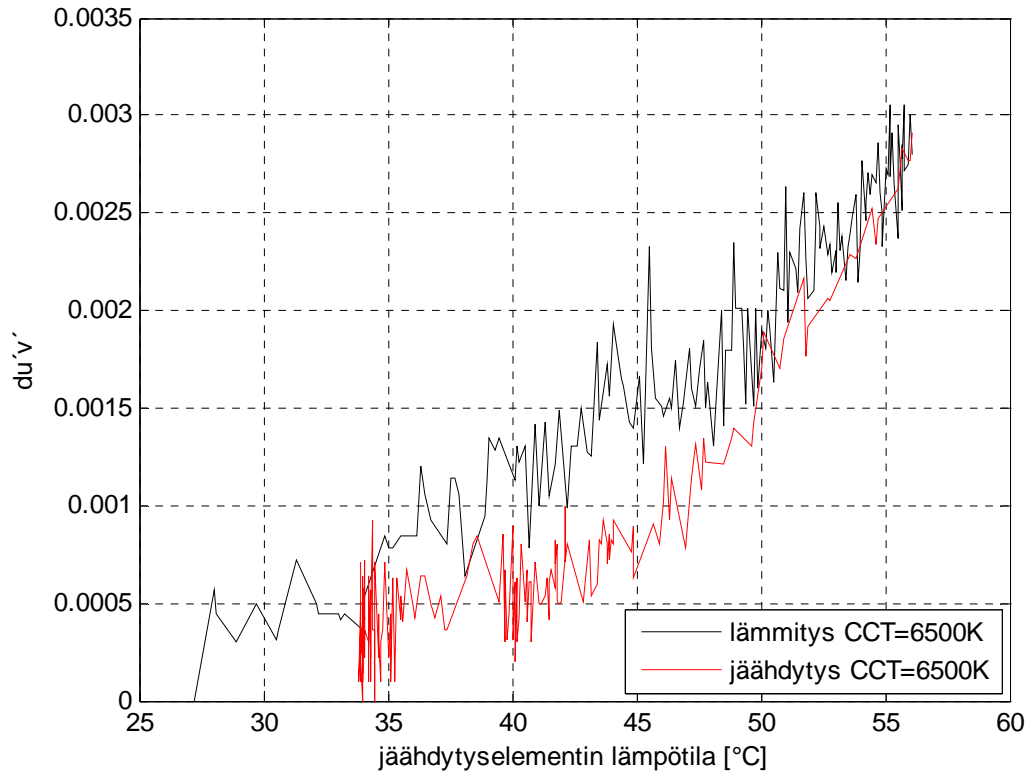
Valon värin stabiilisuuden matemaattinen tarkastelu on mahdollista värikoordinaatistojen avulla. Käyttöön valittiin CIE:n vuoden 1976 tasajakoinen värikoordinaatisto. Pienin väriero, jonka silmä kykenee havaitsemaan, vastaa näin ollen likimain yhtä suurta värikoordinaattieroaa $\Delta u'v'$ riippumatta valon väristä. Valon stabiilisuutta lämpötilan suhteen tarkasteltiin muuttamalla ledien liitoslämpötilaa muuttamalla ledien jäähdytyslementin lämpötilaa ja mittaamalla samanaikaisesti valaisimen säteilyspektriä. Mittauksissa himmennys asetettiin 0 %:iin. Mittaus tehtiin kaksiosaisena lämpötilakompensoinnissa esiintyvän hystereesin selvittämiseksi. Aluksi jäähdytyslementtiä lämmitettiin lämmitysvastuksilla huippulämpötilaan, jonka jälkeen mittauksia jatkettiin jäähdyttämällä jäähdytyslementtiä puhaltimen avulla. Kuvissa 22 - 24 on esitetty säteilyspektrien perusteella laskettu värikoordinaattiero jäähdytyslementin lämpötilan funktiona lämpimän-, neutraalin- ja kylmänvalkoisen värisävyillä. Värikoordinaattiero on laskettu yhtälöllä (14) käyttäen vertailupisteenä alkulämpötilan 25 °C värikoordinaatteja. Kuvassa 25 on esitetty neutraalin valkoisella valolla syntyvä värikoordinaattiero, kun lämpötilakompensointialiohjelma on poistettu käytöstä. Kuvassa 26 on esitetty valon kirkkauden eli valovirran suhteellinen muutos neutraalin valkoisella valolla.



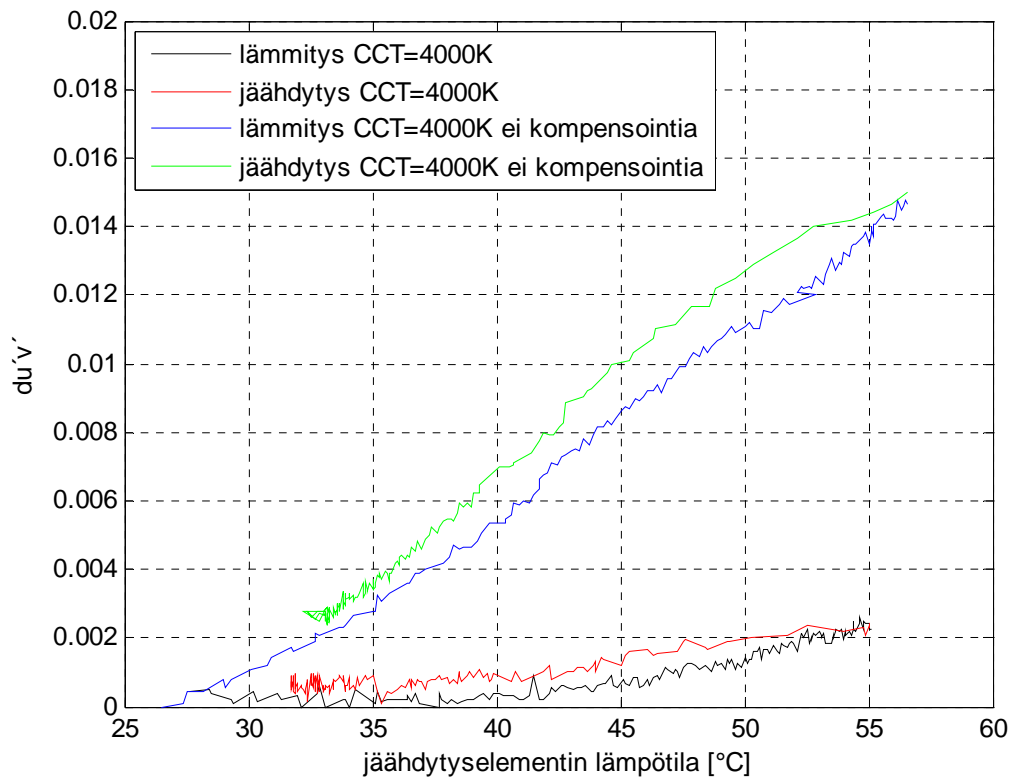
Kuva 22. Lämpimän valkoisen valon värikoordinaattiero, kun vertailupisteenä on huoneenlämpötilä. Pienin silmin havaittava väriero syntyy, kun lämpötilaero on 23 °C.



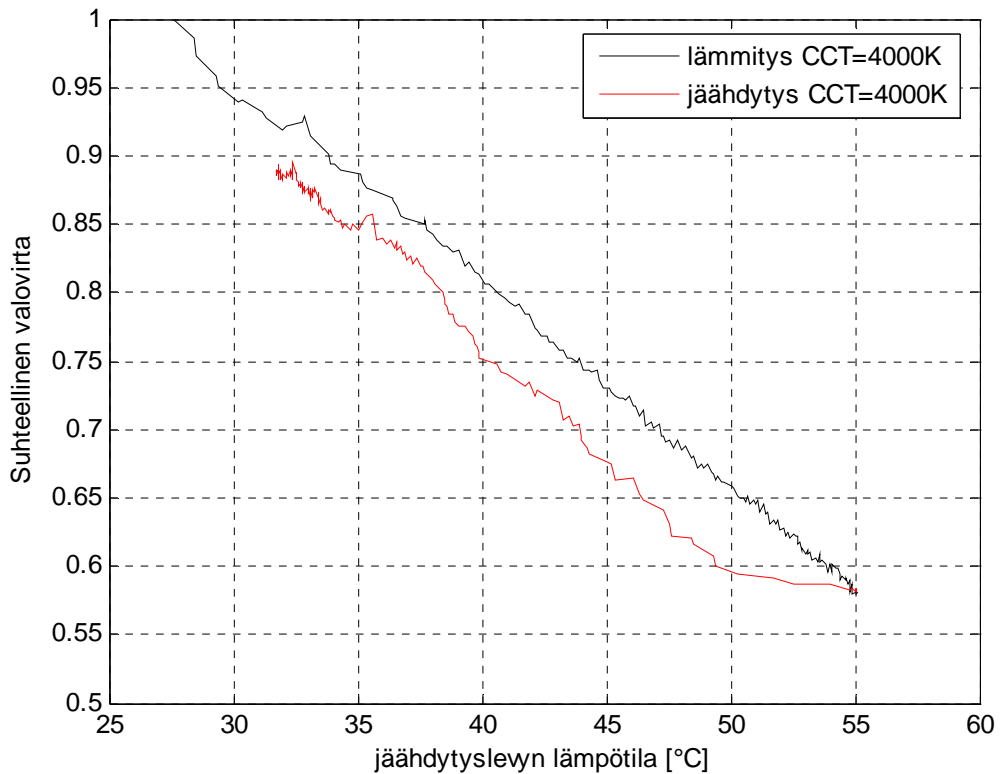
Kuva 23. Neutraalin valkoisen valon värikoordinaattiero, kun vertailupisteenä on huoneenlämpötilä. Väriin muutos on silmin havaittavissa, kun lämpötila on n. 53 °C.



Kuva 24. Kylmän valkoisen valon värikoordinaattiero, kun vertailupisteenä on huoneenlämpötila. Pienin silmin havaittava väriero syntyy, kun lämpötilaero on 26 °C.



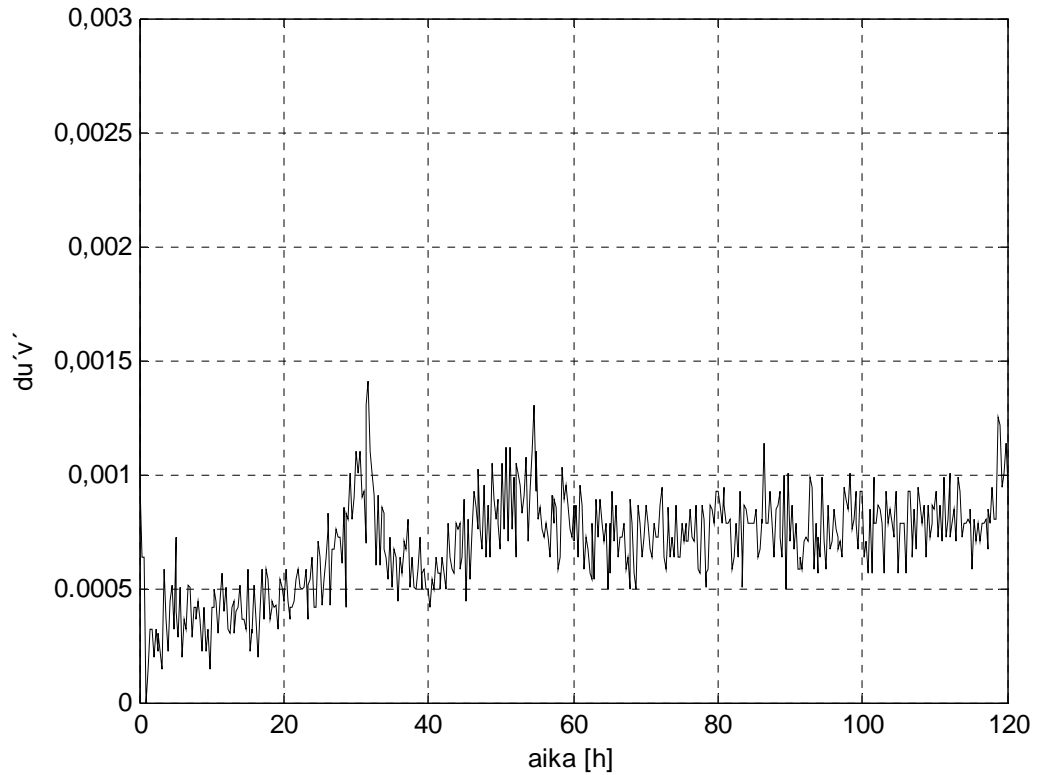
Kuva 25. Neutraalin valkoisen valon värikoordinaattimuutos ilman lämpötilakompensointia. Ilman lämpötilakompensointia väriero on havaittavissa jo muutaman asteen lämpötilamuutoksella.



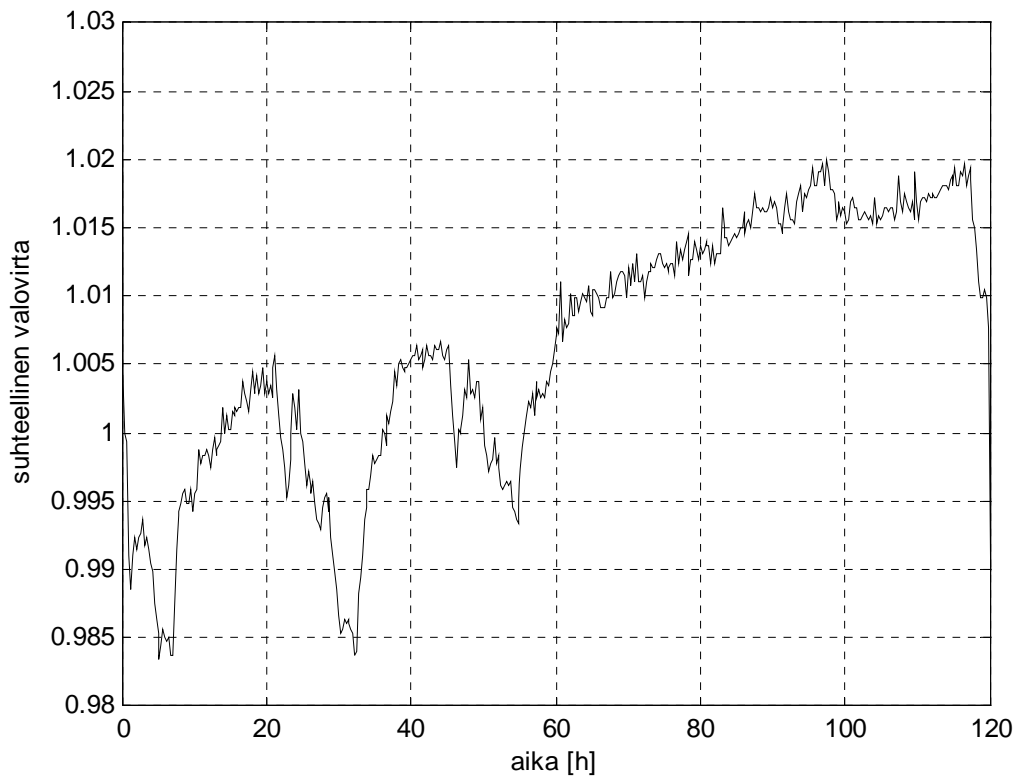
Kuva 26. Valovirran muutos lämpötilan suhteen. Muutos on esitetty alkulämpötilan suhteen.

6.2 Valon stabiilisuus ajan suhteen

Kynnysjännitetakaisinkytkennällä ei pystytä kompensoimaan ledien ikääntymisestä johtuvia optisten ominaisuuksien muutoksia. Ledien ikääntyminen heikentää lämpötilakompensoinnin tarkkuutta. Mittaamalla värikoordinaattieroa ajan suhteen pystytään tekemään johtopäätöksiä sekä säädön toimivuudesta että ledien ikääntymisestä. Mittauksessa tulee ilmi myös mikrokontrolleriohjauksen mahdollinen ryömintä ja muut ohjelmointivirheet. Valon stabiilisuutta ajan suhteen tarkasteltiin mittaamalla valaisimen säteilyspektri 15 minuutin väliajoin 5 päivän ajan. Mittaus suoritettiin huoneenlämpötilassa himmennyksellä 0 % ja väriämpötilalla 4000 K. Kuvissa 27 ja 28 on esitetty värikoordinaattien ja valovirran muutos ajan suhteen.



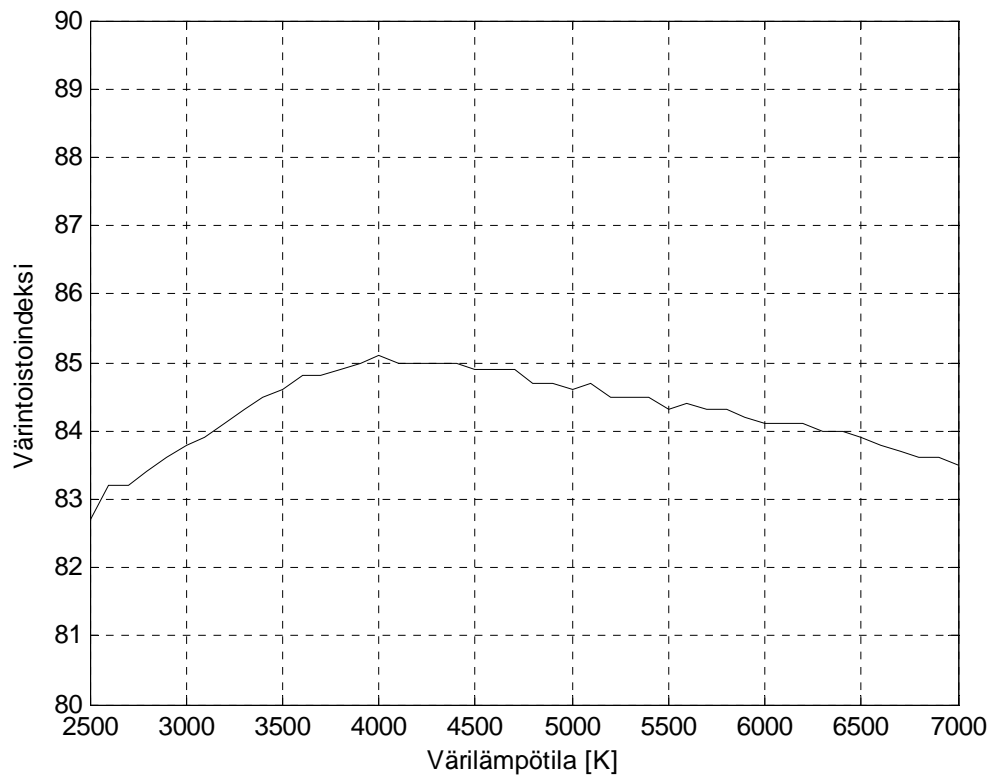
Kuva 27. Neutraalin valkoisen valon värikoordinaattien muutos ajan funktiona. Väriero ei ole silmin havaittavissa.



Kuva 28. Valovirran suhteellinen muutos neutraalin valkoisella valolla. Valovirta kasvaa hieman ledien elinkaaren alussa.

6.3 Värintoistoindeksi

Valaisimen värintoistoindeksi mitattiin spektrofotometrilla eri värilämpötiloilla. Mittaus suoritettiin huoneenlämpötilassa himmennyksellä 0 %. Kuvassa 29 on esitetty valaisimelle mitattu värintoistoindeksi värilämpötilan funktiona. Värintoistoindeksin muutosta tarkasteltiin myös lämpötilan ja ajan suhteen. Kappaleiden 6.1 ja 6.2 mittauksien perusteella värintoistoindeksi pysyy kymmenyksen sisällä sekä ajan että lämpötilan suhteen.



Kuva 29. Värintoistoindeksi eri värilämpötiloilla. Värintoistoindeksi vaihtelee välillä 82.7 - 85.1.

7 MITTAUSTULOSTEN ARVIOINTI

Valon stabiilisuus lämpötilan suhteen on riittävän hyvä miltei kaikkiin kuviteltavissa oleviin sovelluskohteisiin. Pienin silmin havaittavissa oleva värikoordinaattiero $\Delta u'v'$ vaihtelee sovelluskohteesta riippuen väliltä 0.002 - 0.008 (Cypress, 2007), (Muthu, 2002a), (Xiaohui, 2007). Arvoa 0.002 sovelletaan erittäin vaativissa sovelluskohteissa, kuten LCD-näyttöjen taustavalaistuksessa. Tämän suuruisen värikoordinaattieron synty miseksi vaaditaan n. 23 - 28 °C:n lämpötilan muutos riippuen väriämpötilasta. Likimain kaikissa sovelluskohteissa, joissa valaisinta voidaan ajatella käytettävän, toimitaan tätä pienemmillä lämpötilaeroilla. Vaikka lämpötilaero olisikin riittävän suuri, on värimuutosta käytännössä erittäin vaikea havaita. Värikoordinaattiero 0.002 on niin pieni, että se pystytään havaitsemaan vain, jos lähettyvillä on sopiva vertailukohde. Todennäköisesti vertailukohteena on toinen samanlainen valaisin, jolloin vertailtavien valaisimien lämpötilakäyttäytyminen on likimain samanlainen. Lämpötilan muuttuessa molempien valaisimien väri muuttuu samansuuntaisesti, jolloin silmä sopeutuu muutokseen eikä havaitse värieroa. Ilman lämpötilakompensointia lämpötilan merkitys valaisimen valon väriin on merkittävä. Jo 2 - 5 °C:n lämpötilan muutos aiheuttaa värikoordinaattieron 0.002. Tämän suuruinen lämpötilaero voi syntyä helposti vertailtavien valaisimien välille.

Lämpötilakompensoinnin tarkkuutta voidaan verrata lähteessä (Xiaohui, 2007) esitetyn RGB-valaisimen kynnysjännitetakaisinkytkentään. Lähteessä on esitetty vastaavalla tavalla mitattu värikoordinaattiero valkoiselle valolle, jonka väriämpötila on 6500 K. Lähteessä esitettyjen mittaustulosten mukaan värikoordinaattiero on 0.002, kun jäähdityselementin lämpötila on n. 60 °C. Kuvassa 24 esitetyn mittauksen perusteella tätä vastaava lämpötila on n. 50 °C. Tuloksia ei voida suoraan verrata toisiinsa, koska suunnitellussa valaisimessa mitataan neljää kynnysjännitettä kolmen sijaan. Näin ollen myös virhelähteitä on enemmän. Säädön tarkkuutta heikentää eniten kalibrintimittauksien epätarkkuus. Tämän lisäksi tarkkuutta heikentää kynnysjännitteen mittaus, koska PWM-signaalin huippuarvon tarkka mittaus on haastavaa. Ledin jännitteessä on havaittavissa pientä ylitystä ennen pysyvän tilan arvoa. Ylityksen ja pysyvän tilan arvon erottaminen toisistaan on vaikeaa erityisesti pienillä pulssisuhteilla. Muita virhelähteitä säädön toimintaan ovat mm. ledien ikääntyminen, lämpötilan vaikutus muihin komponentteihin sekä mittalaitteiden ja mikrokontrollerilaskennan epätarkkuus.

Valovirran heikkeneminen lämpötilan suhteen on merkittävä. 55 °C:n lämpötilassa valovirta on kaikilla kolmella mitatulla värilämpötilalla n. 40 % pienempi verrattuna huoneenlämpötilan arvoon. Silmän mukautumiskyky kompensoi valovirran heikkenemistä samalla tavalla kuten värimuutosta. Suunnitellulla mikrokontrolleriohjauksella ei pystytä vaikuttamaan valovirran muutokseen. Valovirran heikkeneminen pystyttäisiin haluttaessa kompensoimaan jättämällä kytkentäkertoimiin skaalausvaraa. Tällöin lämpötilan kasvaessa kytkentäkertoimia skaalattaisiin suuremmaksi siten, että valovirran heikkeneminen kompensoituu. Sekä valovirran että värikoordinaattieron mittauksissa lämpötilan suhteen on havaittavissa hystereesiä verrattaessa lämmitystä ja jäädytystä. Ilmiö johtuu jäädytykseen käytetyn puhaltimen ilmavirran vaikutuksesta lämpötila-anturiin, jonka vuoksi jäädytyksessä mitattu lämpötila oli todellista matalampi.

Kappaleen 6.2 mittauksien perusteella voidaan todeta lämpötilakompensoinnin toimivan myös ajan suhteen. Mikrokontrolleriohjauksessa ei esiintynyt virhetilanteita mittauksen aikana. Värikoordinaattiero vertailupisteeseen nähden pysyi koko mittauksen ajan selvästi alle 0.002:ssa. Mikrokontrolleriohjauksessa ei siten synny ajan myötä kumuloituvaa virhettä, jota voisi syntyä esimerkiksi kynnysjännitteen digitaalisessa suodatuksessa. Mittauksen aikana valaisimen valovirta kasvoi muutamalla prosentilla. Ilmiö on tyypillinen suurteholedille. Yleensä valovirta kasvaa hieman ensimmäisten satojen tuntien aikana, jonka jälkeen se laskee takaisin alkuperäiselle tasolle (Philips, 2007). Lyhyen mittausajan vuoksi mittaustuloksista ei voida tehdä johtopäätöksiä ledien eliniästä eikä säädön tarkkuudesta pidemmällä aikajaksolla. Säädön tarkkuuden heikentyessä silmän mukautumiskyky tasoittaa osaltaan syntyviä muutoksia, sillä todennäköisesti viereiset samanlaiset valaisimet ikääntyvät likimain samalla nopeudella. Lisäksi ikääntymisestä johtuvaa väri- ja kirkkausmuutosta voidaan korjata osittain valaisimen omilla sävyn- ja kirkkaudensäätimillä.

Värintoistoindeksi vaihtelee huoneenlämpötilassa väliltä 82.8 - 85.1. Tuloksia voidaan pitää hyvinä led-valaisimelle erityisesti siksi, että värintoistoindeksi pysyy kohtuullisen korkeana riippumatta värilämpötilasta. Mittaustulokset ovat samaa suuruusluokkaa parhaimpien loistevalaisimien kanssa. Tuloksia ei voida verrata vastaaviin neljällä värillä toteutettuihin valaisimiin, koska näistä ei ole saatavilla tietoja. Valkoisen valon tuottoon

tarkoitettuja RGB-led-valaisimia on saatavilla muutamia, mutta näille ei ole ilmoitettu värintoistoindeksiä. Vertailua voidaan tehdä tieteellisissä julkaisuissa esitettyihin prototyyppiasteen valaisimiin. Neljännen led-rivin kytkentäkertoimen optimoinnin lisäksi värintoistoindeksiin voidaan vaikuttaa ledien valinnalla säteilyhuipun aallonpituuden suhteen. Esimerkiksi (Ohno, 2004) on esittänyt neljällä erivärisellä ledillä toteutetun valaisimen, jonka väriämpötila on 3300 K ja R_a -arvo on 97. Kyseisessä valaisimessa ledit on valittu siten, että R_a -arvo on mahdollisimman suuri. Vastaavasti (Li, 2004) esittää neljällä erivärisellä ledillä toteutetulle valaisimelle värintoistoindeksiksi 90 - 95 väriämpötilalla 6500K. Työssä rakennettua prototyyppiä varten ei ollut saatavilla kaikkia ledejä halutuilla aallonpituuden bin-koodeilla. Simulointien perusteella värintoistoindeksi olisi kaikilla väriämpötiloilla n. 95, jos käytössä olisi optimaaliset ledit. Tällöin värintoistoindeksissä päästäisiin samaan luokkaan edellä mainittujen julkaisujen kanssa. Kolmella erivärisellä ledillä toteutetuilla RGB-valaisimilla jäädyään yleisesti selvästi alle mitattujen R_a -arvojen. Kolmen ledin tapauksessa ledien optimoinnilla voidaan päästä parhailaan samaan luokkaan kappaleen 6.1 mittaustulosten kanssa (Narendran, 2002).

Pienikin säteilyhuipun aallonpituuden muutos voi vaikuttaa R_a -arvoon merkittävästi. Tällaisissa tilanteissa todellinen värintoisto-ominaisuuksien muutos ei ole todennäköisesti yhtä suuri kuin värintoistoindeksin muutos antaa ymmärtää. Värintoisto-ominaisuuksien kuvaus värintoistoindeksillä ei siten välttämättä vastaa lainkaan ihmisen käsitystä värintoistosta, kuten esimerkiksi (Narendran, 2002) on esittänyt. Suunnitellun valaisimen etuna tässä suhteessa on reaaliaikainen sävyn- ja kirkkaudensäätö, joilla käyttäjä voi säätää valaistuksen mieleisekseen juuri kyseessä olevaan sovelluskohteeseen.

7.1 Tuotteen jatkokehitys

Mittaustuloksien perusteella voidaan todeta valaisimelle asetettujen vaatimusten toteutuvan suurimmaksi osaksi. Lämpötilakompensointi toimii riittävällä tarkkuudella, mutta värintoistoindeksissä ei saavutettu vaadittuja, yli 90:n arvoja. Värintoistoindeksi olisi täyttänyt vaatimukset, jos prototyyppiin olisi saatu ledejä optimaalisilla bin-koodeilla. Prototyyppi ja mittaustulokset antavat hyvän pohjan tuotteen jatkokehitykselle. Valaisin vaatii jatkokehitystä erityisesti tuotannollisesta näkökulmasta. Kalibrointimittaukset ja värintoisto-ominaisuuksien optimointi täytyy tehdä jokaiselle valaisimelle erikseen.

Tuotantoa ajatellen nämä toimenpiteet pitäisi pystyä automatisoimaan mahdollisimman pitkälle. Toinen jatkokehitysidea liittyy ledien ohjauksen kehittämiseen. Jos PWM-ohjaus korvaamaan monimutkaisemmalla virtaohjauksella, saavutetaan useita etuja. Virtaohjauksen etuja ovat mm. valotehokkuuden kasvu matalilla virroilla, kynnysjännitteen helpompi mittaaminen, sähkömagneettisten häiriöiden vähäisyys ja patenttiriitojen välttäminen. Virtaohjaus vaatisi kuitenkin enemmän laskentakapasiteettia ja monimutkaisemman ohjauksen kolmivärikomponenttien ja virran epälineaarisen riippuvuuden vuoksi.

8 YHTEENVETO

Led-tekniikkaa tullaan käyttämään entistä enemmän kaikenlaisissa valaistussovelluksissa. Led-tekniikalla on useita etuja verrattuna perinteisiin valaistusratkaisuihin. Etuina ovat mm. pitkä elinikä, mekaaninen kestävyys, pieni koko, ympäristöystävällisyys ja matala jännitetaso. Led-tekniikalla pystytään toteuttamaan reaaliaikainen sävyn ja kirkkauden säätö. Nämä ominaisuudet mahdollistavat ledien käytön sekä perinteisten valaistusratkaisujen korvaajina että aivan uudenlaisissa sovelluskohteissa.

Nykyisin ledejä käytetään laajalti erilaisissa pienen mittakaavan erikoissovelluksissa, erityisesti jos vaatimuksena on valon värillisuus. Tällaisia sovelluksia ovat mm. mainostaulut sekä merkinanto- ja varoitusvalot. Led-tekniikan yleistymistä yleisvalaistuksessa on rajoittanut hinta ja heikko valontuotto verrattuna kilpaileviin ratkaisuihin. Led-tekniikan kehitys on ollut nopeaa, nykyisten kaupallisten valkoisten ledien valotehokkuus on n. 2 - 5 -kertainen hehkulamppuihin verrattuna, kun puolestaan loisteputkien valotehokkuus on noin viisinkertainen hehkulamppuun nähden. Tulevaisuudessa ledeillä uskotaan päästävän 10 - 15 -kertaiseen valotehokkuuteen hehkulamppuun nähden. Haasteen led-valaisimien suunnittelulle asettaa myös ledien sähköisten ja optisten ominaisuuksien runsas vaihtelu virran, ajan, lämpötilan ja eri yksilöiden suhteen. Tulevaisuudessa suurin haaste on kehittää led-tekniikasta riittävän kilpailukykyinen myös yleisvalaistukseen.

Työssä suunniteltiin mikrokontrolleriohjaus valkoista valoa tuottavalle led-valaisimelle, joka perustuu punaisten, vihreiden, sinisten ja meripihkan väristen ledien valon sekoittamiseen. Käyttäjä pystyy säätämään valaisimen värisävyä ja kirkkautta reaaliaikaisesti. Värien sekoitus perustuu väriensekoitusteoriaan, jossa kunkin ledin suhteellista intensiteettiä säädetään halutun summaväriin aikaansaamiseksi. Kunkin ledin intensiteettiä säädetään pulssinleveysmodulaatiolla. Pulssinleveyksien laskenta toteutetaan mikrokontrollerilla. Mikrokontrolleriohjaus sisältää myös säätöalgoritmin, jolla kompensoidaan ledien liitoslämpötilan muutoksista aiheutuvat optisten ominaisuuksien muutokset ja parannetaan siten sekoitetun valon stabiilisuutta.

Työn tavoitteena oli suunnitella valaisin, jonka värintoisto-ominaisuudet ovat mahdollisimman hyvät kaikilla valkoisen värisävyillä. Lisävaatimuksena oli valon riittävä stabiilisuus lämpötilan ja ajan suhteen. Värintoisto-ominaisuuksien arviointiin käytettiin värintoistoindeksiä. Mittausten perusteella valaisimen värintoisto-ominaisuudet ovat hyvät kaikilla valkoisen sävyillä. Ledien optimaalisella valinnalla voidaan päästä vieläkin korkeampiin arvoihin. Mitatut värintoistoindeksit ovat samaa luokkaa parhaimpien RGB-led- ja loistevalaisimien kanssa. Väriin stabiilisuutta tarkasteltiin värikoordinaattierojen avulla. Mittaustulosten perusteella voidaan todeta värin olevan riittävän stabiili sekä lämpötilan että ajan suhteen. Mikrokontrolleriohjaus parantaa värin stabiilisuutta lämpötilan suhteen merkittävästi. Lämpötilakompensointi kykenee pienentämään lämpötilan muutoksesta syntyvän värimuutoksen niin pieneksi, että sitä on käytännössä mahdotonta havaita. Säätojärjestelmä ei pysty huomioimaan ledien ikääntymisestä johtuvia optisten ominaisuuksien muutoksia. Ikääntymisestä aiheutuvaa virhettä pyrittiin pienentämään hidastamalla ledien ikääntymistä. Onnistuneen termisen suunnittelun ja ledien kuormituksen mitoituksen ansiosta ledien ikääntymisen vaikutukset näkyvät vasta kymmenien tuhansien käyttötuntien jälkeen.

Työssä rakennetun prototyypin ja saatujen mittaustulosten pohjalta valaisimelle voidaan tehdä jatkokehitystä kohti tuotantoon soveltuvaa mallia.

LÄHDELUETTELO

- (ABB, 2002) ABB:n TTT käsikirja. Luku 21: Valaistustekniikka. 2000. [pdf-dokumentti] [Viitattu 18.6.2008] saatavilla: [http://www02.abb.com/global/fiabb/fiabb255.nsf/viewunid/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B/\\$file/210_0007.pdf](http://www02.abb.com/global/fiabb/fiabb255.nsf/viewunid/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B/$file/210_0007.pdf)
- (Cypress, 2007) Cypress Semiconductor. Application Note 33640. Color Mixing Accuracy with EZ-Color High-Brightness LED Controllers. [pdf-dokumentti] [Viitattu 7.7.2008] saatavilla: http://download.cypress.com.edgesuite.net/design_resources/application_notes/contents/color_mixing_accuracy_with_ez_color_tm_high_brightness_led_controllers__an33640_12.pdf
- (EU, 2008) Euroopan yhteisöjen komissio. (KOM)2008 241 lopullinen. Parempaan energiatehokkuuteen tieto- ja viestintäteknologian avulla. [word-dokumentti]. Bryssel 13.5.2008. [Viitattu 23.6.2008] saatavilla: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0241:FIN:FI:DOC>
- (Halonen, 1992) Halonen, Liisa & Lehtovaara, Jorma. 1992. Valaistustekniikka. Otatieto Oy. Jyväskylä. 456 s. ISBN: 951-672-145-1.
- (Li, 2004) Li, Y.-L et al. Illumination sources based on multiple light-emitting diodes. [pdf-dokumentti] Lasers and Electro-Optics, 2004. (CLEO). 16-21 May 2004 [Viitattu 21.8.2008] saatavilla: <http://ieeexplore.org/>
- (Malacara, 2002) Malacara, Daniel. 2002. Color Vision and Colorimetry: Theory and Applications. Bellingham, Washington. SPIE. 164 s.
- (Muthu, 2002a) Muthu, Subramanian et al. Red, Green, and Blue LEDs for White Light Illumination. [pdf-dokumentti] IEEE journal on selected topics in quantum electronics, Vol. 8, No. 2, March/April 2002. [Viitattu 18.6.2008] saatavilla: <http://ieeexplore.org/>

- (Muthu, 2002b) Muthu, Subramanian et al. Red, Green, and Blue LED based white light generation: Issues and control. [pdf-dokumentti] Industry Applications Conference 2002. 37th IAS Annual Meeting. [Viitattu 25.6.2008] saatavilla: <http://ieeexplore.org/>
- (Muthu, 2003) Muthu, Subramanian et al. Red, Green, and Blue LED-based White Light Source: Implementation Challenges and Control Design. [pdf-dokumentti] Industry Applications Conference 2003. 38th IAS Annual Meeting. [Viitattu 25.6.2008] saatavilla: <http://ieeexplore.org/>
- (Narendran, 2002) Narendran, Nadarajah & Deng, Lei. Color Rendering Properties of LED Light Sources. [pdf-dokumentti] Solid State Lighting II: Proceedings of SPIE. 2002. [Viitattu 18.6.2008] saatavilla: <http://ieeexplore.org/>
- (Nathan, 2006) Nathan, Sheryl et al. Energy Saving Using Light Emitting Diodes in Lighting Applications. [pdf-dokumentti] Universities Power Engineering Conference 2006. [Viitattu 23.6.2008] saatavilla: <http://ieeexplore.org/>
- (NIST, 2006) NIST. Physics Laboratory, Optical Technology Division. Color Rendering of Light Sources. 2006. [www-dokumentti] [Viitattu 18.6.2008] saatavilla: <http://physics.nist.gov/Divisions/Div844/facilities/vision/color.html>
- (NTIS, 2003) National Technical Information Service. Energy Savings Estimates of Light Emitting Diodes in Niche Lighting Applications. 2003. [pdf-dokumentti] [Viitattu 23.6.2008] saatavilla: <http://www.netl.doe.gov/ssl/pdfs/niche%20final%20report.pdf>
- (OEE, 2006) Office of Energy Efficiency, Natural Resources Canada. Lighting Reference Guide - Understanding the Theory. 2006. [www-dokumentti] [Viitattu 9.7.2008] saatavilla: <http://www.oee.nrcan.gc.ca/publications/equipment/lighting/section3.cfm?attr=0#Spectral>

- (Ohno, 2004) Ohno, Yoshi. Color Rendering and Luminous Efficacy of White LED Spectra. [pdf-dokumentti] Fourth International Conference on Solid State Lighting. 2004. [Viitattu 18.6.2008] saatavilla: <http://ieeexplore.org/>
- (Ohno, 2006) Ohno, Yoshi. Optical metrology for LEDs and solid state lighting. [pdf-dokumentti] Fifth Symposium Optics in Industry. 2006. [Viitattu 23.6.2008] saatavilla: <http://ieeexplore.org/>
- (Pan, 2005) Pan, Jiangen et al. Simulation Analysis of Luminous Efficiency and Color Rendering of CCT Tunable White LEDs. [word-dokumentti]. 6th International Conference on Energy-Efficient Lighting. 2005. [Viitattu 19.6.2008] saatavilla: www.rightlight6.org/english/proceedings/Session_16/Simulation_Analysis_of_Luminous_Efficiency/f149pan.doc
- (Philips, 2006) Philips Lumileds Lighting Company. Application Brief AB17. Benefits of Philips Lumileds Solid State Lighting Solutions. vs. Conventional Lighting. 2006. [pdf-dokumentti] [Viitattu 23.6.2008] saatavilla: <http://www.lumileds.com/pdfs/AB17.pdf>
- (Philips, 2007) Philips Lumileds Lighting Company. Reliability datasheet RD07. LUXEON Rebel Reliability Data. 2007. [pdf-dokumentti] [Viitattu 24.6.2008] saatavilla: <http://www.lumileds.com/pdfs/RD07.pdf>
- (Philips, 2008) Philips Lumileds Lighting Company. Technical Datasheet DS56. power light source LUXEON Rebel. 2008. [pdf-dokumentti] [Viitattu 24.6.2008] saatavilla: <http://www.lumileds.com/pdfs/DS56.pdf>
- (Schubert, 2006) Schubert, Fred E. Tiivistelmä kirjasta Light-Emitting diodes. 2006. [pdf-dokumentti] [Viitattu 18.6.2008] saatavilla: <http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/LED-slide-show.pdf>

- (Steigerwald, 2002) Steigerwald, Daniel A. et al. Illumination With Solid State Lighting Technology. [pdf-dokumentti] IEEE journal on selected topics in quantum electronics, Vol. 8, No. 2, March/April 2002. [Viitattu 23.6.2008] saatavilla: <http://ieeexplore.org/>
- (Xiaohui, 2007) Xiaohui, Qu et al. Color Control System for RGB LED Light Sources Using Junction Temperature Measurement. [pdf-dokumentti] The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON). Nov. 5-8, 2007, Taipei, Taiwan. [Viitattu 24.6.2008] saatavilla: <http://ieeexplore.org/>